



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

도시계획학 석사학위논문

혁신확산이론을 통해 본 서울시

미니태양광 확산 요인

- 공간 분포 특성을 중심으로 -

2019년 8월

서울대학교 환경대학원

환경계획학과 환경관리학 전공

김 문 현

국문초록

기후변화에 대응하기 위해 탄소를 적게 배출하려는 다양한 노력이 시도되고 있다. 전기에너지 분야도 예외는 아니다. 전통적으로 석탄과 같은 화석연료가 값이 싸고, 어렵지 않게 이용할 수 있어 널리 사용되었지만, 연소 시 이산화탄소를 많이 배출시킨다는 치명적인 단점이 있다. 이에 대기 중 이산화탄소 농도를 완화하기 위한 목적으로, 전기 생산 과정에서 이산화탄소를 거의 배출하지 않는 재생가능에너지에 대한 관심이 증가하고 있다. 다양한 재생가능에너지 중에서도 태양광을 이용한 발전이 전 세계적으로 가장 빠른 속도로 성장하고 있다.

서울시는 2012년부터 에너지 사용을 줄이는 동시에 에너지 자립률을 높이기 위해 ‘원전하나줄이기’ 정책을 시행하고 있다. 가정용 태양광은 ‘원전하나줄이기’ 정책의 주요 사업 중 하나로, 2017년에는 ‘2022 태양의 도시, 서울’을 선포하여 2022년까지 100만 가구에 태양광을 보급하기 위한 목표를 세웠다. 특히, 아파트 베란다에 설치되는 미니태양광 확산 정책은 아파트가 밀집해 있으며, 인구가 과밀하고, 압축적인 도시의 공간적인 특성을 잘 반영한 정책으로 평가할 만하며, 보급이 빠르게 확산하고 있다. 한편, 서울시와 자치구는 미니태양광을 설치하는 세대에 보조금을 지급한다. 보조금은 전체금액의 최대 75%까지 지원하고 있는데, 서울시의 미니태양광 보급 목표가 약 605,185가구인 것을 감안하면 과도한 측면이 있다. 이에 점차 재정적인 부담이 가중될 것이 자명하다. 이러한 이유로 보조금을 축소하기 위한 여러 가지 방안을 모색하고 있지만, 보조금 축소가 미니태양광 보급에 걸림돌이 될 것이라는 우려 또한 무시할 수 없다.

혁신확산이론은 새롭게 나타난 혁신의 전파 과정을 설명하는 이론이다. 선행연구에 따르면, 혁신을 받아들인 사람들에게 나타나는 공통적인 규칙이 있으며, 이때 구성원들 사이의 커뮤니케이션이 중요하게 작용한다. 이를 동질성을 가진 집단 내에서 발생하는 사회적 상호작용으로 설

명할 수 있다. 더불어 확산의 영향력이 거리에 반비례하여 발생한다는 연구 결과가 다양한 분야에서 보고되고 있다. 가정용 태양광 설비의 확산에 관하여도 혁신 확산의 특성을 확인하기 위한 다양한 연구가 존재한다.

본 연구는 서울시의 아파트단지를 대상으로 2014년부터 2017년까지 미니태양광 확산이 가지는 특성을 살펴보고자 한다. 서울시의 미니태양광은 보급이 빠르게 증가하고 있지만, 지역에 따라 그 정도와 수준이 다르게 나타난다. 공간적으로 채택률에 차이를 유발하는 영향력 있는 원인이 있음을 유추할 수 있다. 이에 본 연구는 동질성을 가진 집단인 아파트를 대상으로 미니태양광 확산에 영향을 미치는 변수가 무엇인지 확인한다. 더불어 미니태양광 확산에 있어 이웃효과가 영향을 미치는지 확인하는 동시에 공간적인 영향력의 범위를 살펴보았다.

연구는 2014년부터 2017년까지 서울시 795개의 분양 아파트단지를 대상으로 패널데이터를 수집하여 분석을 진행하였다. 종속변수는 2014년부터 2017년까지 각 해의 아파트단지 미니태양광 신규 설치 세대수이며, 이산분포하고 음수가 없는 가산자료이다. 또한, 미니태양광 정책 시행기간이 짧아 아직 미니태양광을 하나도 설치하지 않은 아파트단지가 많으므로 종속변수에 영(0)이 많이 존재한다. 이에 영과잉 음이항 모형을 사용하여 분석을 진행하였다. 모형을 설명하기 위한 독립변수는 인구요인, 경제요인, 사회요인, 건조환경요인, 이웃효과요인의 다섯 가지 요인, 16개 변수를 사용하였다. 분석을 위한 모형은 총 세 가지 단계로 진행하였다. 먼저 795개 아파트단지 전체모형을 대상으로 분석하였다. 이후 유력한 변수로 도출된 에너지자립마을 변수를 기준으로 구성한 모형을 분석하고, 마지막으로 서울시 집계구를 대상으로 공간적 상관관계에 따른 영향력을 살펴보았다.

연구 결과 인구, 경제, 건조환경, 사회 요인의 9가지 변수, 즉 중년 인구, 보조금, 세대수가 많을수록, 소득, 아파트 나이가 적을수록, 에너지자립마을에 참여한 아파트단지와 자치단체장이 진보성향을 가진 자치구일수록 미니태양광을 많이 설치하는 것으로 드러났다. 이 연구에서 초점

을 맞춘 이웃효과에서도 아파트단지 내부와 외부의 효과가 모두 유의하게 나타났다. 아파트단지 내부는 아파트단지의 전년도까지의 미니태양광 설치밀도로 구성하였으며, 미니태양광 설치밀도가 높은 아파트단지에서 다음 해 신규 설치가 많았다. 아파트단지 외부 효과를 보기 위해서는 아파트단지를 중심으로 500m, 1,000m, 1,500m 반경의 전년도까지의 미니태양광 설치 세대수가 영향을 미치는지 살펴보았고, 500m에서 신규 설치 증가에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 두 번째로, 에너지자립마을 모형에서는 에너지자립마을에 참여한 아파트단지가 많은 열 개 구와 그렇지 않은 열 개 구를 비교하였는데, 에너지자립마을 변수가 미니태양광 신규 설치에 영향을 미치며 이웃효과가 좀 더 활발하게 나타나는 것을 확인하였다. 마지막으로 서울시의 집계구를 대상으로 미니태양광 설치의 공간적 상관관계가 발견되어 핫스팟과 콜드스팟 지역을 비교해보았다. 그 결과 핫스팟에서는 이웃효과가 유의하게 도출되었지만 콜드스팟에서는 모든 이웃효과 변수가 유의하지 않았다.

본 연구는 미니태양광 확산에 있어 이웃효과가 존재함을 실증적으로 규명하였다. 이는 보조금에 의존하여 추후 재정적인 부담이 예상되는 서울시의 미니태양광 확산 정책을 위한 다양한 경로를 제시한다. 더불어 에너지자립마을을 통해 직·간접적으로 미니태양광 보급을 확산시킬 수 있다는 가능성을 확인하였다. 마지막으로 이웃효과의 영향력에 따른 핫스팟과 콜드스팟 지역의 특성을 구분하여 지역 특성에 맞는 정책 개발의 필요성을 다시금 확인하였다.

주요어 : 가정용 미니태양광, 재생가능에너지, 혁신확산이론, 이웃효과, 대도시, 에너지자립마을

학 번 : 2017-21221

목 차

I. 서 론	1
1. 연구의 배경 및 목적	1
2. 연구 대상 및 범위	4
3. 연구 방법	5
II. 이론 및 선행연구 고찰	8
1. 혁신확산이론	8
2. 선행연구 고찰	11
1) 사회적 상호작용의 영향	11
2) 행동이론을 활용한 연구	13
III. 서울시 미니태양광 정책	15
1. 원전하나줄이기 정책	15
2. 가정용 미니태양광 현황	17
IV. 분석 방법	20
1. 연구 자료	20
1) 종속변수	22
2) 설명변수	24
3) 상관관계 분석	32
2. 서울시 미니태양광의 공간분포 현황	33
3. 연구 모형	35

V. 결과 해석	37
1. 기초통계	37
2. 분석결과	38
1) 전체모형	38
2) 에너지자립마을 모형	45
3) 공간적 자기상관 모형	48
3. 토의	52
VI. 결론	55
1. 요약 및 시사점	55
2. 연구의 한계 및 향후 연구 방향	58
참고문헌	59

표 목 차

[표 3-1] 서울시 자지구별 보조금 지급현황	18
[표 4-1] 자치구별 표본 크기	21
[표 4-2] 분석에 사용한 변수 설명 및 출처	31
[표 5-1] 변수의 기초통계	38
[표 5-2] 미니태양광 설치세대 및 에너지 자립마을 참여 단지수 ...	38
[표 5-3] 서울시 전체 모형 분석결과	40
[표 5-4] 에너지자립마을 모형 분석결과	47
[표 5-5] 공간적 자기상관 모형 분석결과	51

그림 목 차

[그림 1-1] 베란다 및 주택형 미니태양광 설치개수	4
[그림 1-2] 연구흐름도	7
[그림 3-1] 원전하나줄이기 1단계의 분야별 목표와 달성 성과	15
[그림 3-2] 서울시 미니태양광 보급률	17
[그림 3-3] 자치구별 미니태양광 설치 밀도(2017년)	19
[그림 3-4] 노원구 행정동별 미니태양광 설치밀도	19
[그림 4-1] 미니태양광 설치 세대수별 아파트단지 수	22
[그림 4-2] 인접한 미니태양광 개수 추출 과정	27
[그림 4-3] 설명변수 간 상관관계	32
[그림 4-4] 집계구별 미니태양광 설치밀도	34
[그림 4-5] 미니태양광 설치밀도의 공간적 자기상관	35

I. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

인류의 인위적인 활동으로 배출되는 이산화탄소가 지구가 수용할 수 있는 용량의 한계를 넘어섰다. 지구를 안전하게 유지하는 9가지 경계 중 하나인 대기 중 이산화탄소 농도는 350ppm이 지구가 견뎌낼 수 있는 임계점으로 여겨졌다(Rockström et al, 2009). 그러나 이산화탄소 농도는 2014년에 400ppm을 돌파하여 계속해서 증가하는 추세이며, 또 다른 9가지 경계 중 하나인 인위적인 복사강제력 역시 $+2.3W/m^2$ 로 우려할만한 수준이다(Steffen et al, 2014). 대기 중 이산화탄소의 증가 및 지구의 복사강제력 상승은 지구온난화를 일으켜 홍수, 가뭄, 극한 기온 등 이상 기후 현상의 원인으로 지목된다. 이에 기후변화를 완화하기 위해 탄소를 적게 배출하려는 다양한 노력이 시도되고 있다.

석탄은 전통적으로 가정, 산업 및 전기 생산을 위해 활발하게 사용되던 에너지원이었다(Allen, 2013). 1970년대 이후로는 대부분 전력생산에 소비되고 있는데, 미국은 석탄을 이용해 약 45%의 전력을 생산하고 있다(Towler, 2014). 그러나 석탄을 이용한 전기 생산은 전 세계 에너지 관련 이산화탄소의 약 41%나 차지할 정도로 많은 양의 이산화탄소를 배출한다(EIA, 2017). 이에 최근 들어, 이산화탄소 배출을 줄이기 위한 목적으로 이산화탄소가 거의 발생하지 않는 재생가능에너지를 사용한 전기 생산이 주목받고 있다. 재생가능에너지의 또 다른 장점은 기존의 중앙집중적이고 대규모 생산에 적합한 화석연료 기반의 에너지 구조와는 달리 다양한 에너지원을 사용한 분산된 소규모 생산이 가능하다는 점이다. 국내에서도 전력 에너지 정책의 패러다임이 중앙집중적인 대규모 발전소 공급 중심에서 에너지 수요관리 및 신재생에너지 중심으로 전환되고 있다(홍중호 외, 2017).

한편, 서울시는 대한민국에서 지역 분산적 에너지 체제로의 전환을 위

해 가장 적극적인 노력을 하는 도시이다. 서울시의 에너지 정책은 ‘원전 하나줄이기’로 대표할 수 있는데, 2012년부터 시작된 이 사업은 시민들의 참여를 바탕으로 에너지 사용량을 절감하고 재생가능에너지 생산을 통한 에너지자립률 증가를 목표로 한다. 이 정책의 1단계 사업을 통해 서울시는 에너지자립률을 2011년 2.9%에서 2014년 5%까지 올리는데 성공했고, 2단계 사업을 통해 2020년까지 20%로 높이려고 한다(서울특별시, 2014). 이에 2017년에는 서울시 3가구 중 1가구에 태양광 설비를 보급해 2022년까지 100만 가구에 태양광을 보급하는 ‘태양의 도시’를 선포하고, 태양광 지원센터를 설립해 설치와 A/S를 위한 윈스탑 서비스를 구축하고 있다. 2014년부터 본격적으로 시행되고 있는 미니태양광 확산 정책은 서울과 같은 대도시의 에너지자립 가능성을 살펴봄에 있어 큰 함의를 갖는다. 그럼에도 불구하고 아직 시행 기간이 짧고 가용할 수 있는 자료의 부족으로 관련 연구가 매우 부족한 실정이다.

혁신확산이론(Diffusion of Innovation Theory)은 새로운 것으로 인식되는 아이디어, 관행 혹은 사물을 받아들이는 과정을 설명하기 위한 이론이다(Rogers, 2005). 혁신의 채택에 영향을 미치는 인지된 다섯 가지 특성(상대적 이점, 적합성, 시험가능성, 관찰가능성, 복잡성), 혁신이 전파되는 속도, 그리고 전파되는 과정에서 발생하는 사회 구성원들 간의 상호작용이 주 관심사이다. 특히 혁신 제품의 전파가 구성원들 간의 입소문에 의한 상호작용에 의존하는데, 이를 사회적 상호작용의 효과 또는 이웃효과라고 한다. 가정에서 설치하는 미니태양광은 기존의 중앙집중적인 전력생산 및 공급의 방식에서 탈피하여 소규모 분산형으로 전력 소비자가 직접 생산자가 된다는 점에서 혁신 제품으로 간주할 수 있다. 가정용 태양광을 혁신 제품으로 간주하고 확산에 미치는 영향력 있는 요인을 살펴본 연구에서 사회적 상호작용의 효과가 영향력이 있음이 밝혀졌다(Graziano·Gillingham, 2014; Rode·Weber, 2016, Müller·Rode, 2013; 이성재, 2018).

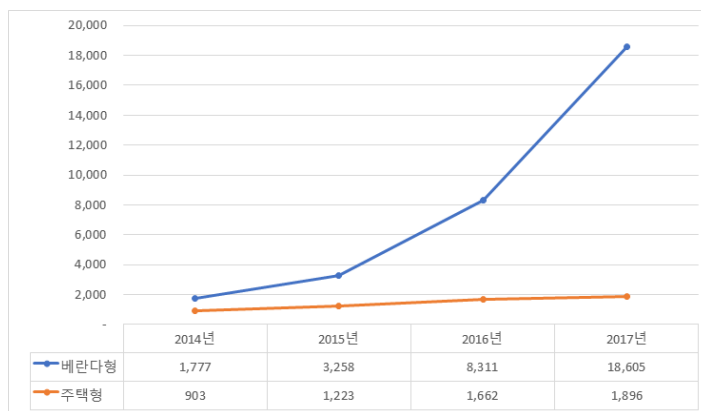
이러한 배경에서 이 연구는 서울시 가정용 미니태양광 채택에 영향을 미치는 공간 특성을 실증적으로 규명하고자 한다. 공간적으로 동질성을

가진 아파트단지에서 나타나는 미니태양광의 분포 특성을 설명한다. 특별히 기존의 가정용 미니태양광을 채택한 아파트단지를 중심으로 발생하는 사회적 상호작용의 영향력에 주목한다. 이를 통해 서울의 아파트단지에서 나타나는 가정용 미니태양광 분포의 공간적 특성을 이해하고, 미니태양광 채택에 영향력 있는 요인을 발견하는 것이 이 연구의 목표이다.

2. 연구 대상 및 범위

본 연구는 시간적으로 2014년부터 2017년까지, 공간적으로 서울시 전체 아파트를 대상으로 한다. 서울시는 2012년에 원전하나줄이기 정책을 시작하면서 에너지자립을 목표로 민자를 활용한 대규모 태양광발전, 학교태양광, 주택태양광, 아파트 베란다를 활용한 미니태양광 정책을 확대 시행하였다. [그림 1-1]은 2014년부터 2017년까지 설치된 베란다 및 주택형 미니발전소 보급현황을 보여준다. 주택형 태양광에 비해 아파트 베란다형 미니태양광 설치 대수의 증가가 돋보인다.

공간적으로는 서울시의 아파트단지를 대상으로 한다. 일반적으로 아파트는 사회·경제적으로 비슷한 수준의 사람들이 모여 있는 집단으로 볼 수 있다(천현숙·윤정숙, 2001). 모집단 기준은 다음과 같다. 첫째, 이 연구의 목적에 따라 2014년부터 2017년까지의 시계열 자료 구축이 가능하도록 2014년 이전에 준공된 아파트가 대상이다. 둘째, 자료의 한계로 인해 설명변수 자료가 누락된 아파트는 제외하였다. 이로써 4년간의 패널 데이터를 구축할 수 있는 총 795개 아파트단지를 분석대상으로 한다.



[그림 1-1]. 베란다 및 주택형 미니태양광 설치개수

출처: 서울시 내부자료

3. 연구 방법

연구의 진행 순서는 다음과 같다. 서울시의 아파트단지를 대상으로 사회적 상호작용의 효과와 공간적 특성의 영향력을 살펴본다. 먼저 이론적 배경인 혁신확산이론과 본 논문에서 혁신 전파의 중요 요인으로 다루어지는 사회적 상호작용에 관해 소개한다. 그다음 가정용 태양광 설비의 확산을 연구한 다양한 종류의 선행연구를 고찰한다. 첫 번째로, 이웃효과와 같은 형태의 사회적 상호작용에 의한 가정용 미니태양광 확산의 영향력을 다룬 연구를 살펴본다. 공간적 동질성을 기반으로 인구·사회·경제·정치·환경의 다양한 변수의 영향력을 함께 정리하였다. 둘째, 혁신확산이론, 계획된 행동이론, 가치신념규범 이론 등의 행동이론을 바탕으로 미니태양광을 채택하는 개인의 인식 및 태도를 살펴본 연구를 고찰한다.

본 연구의 공간적 범위인 서울시는 에너지자립률을 높이기 위한 방법으로 태양광 발전을 확산시키기 위해 다양한 노력을 하고 있다. 이를 위한 정책 수단인 서울시의 원전하나줄이기 정책을 중심으로 태양광 발전소 확산과 관련한 정책을 개괄하고 현황을 정리한다.

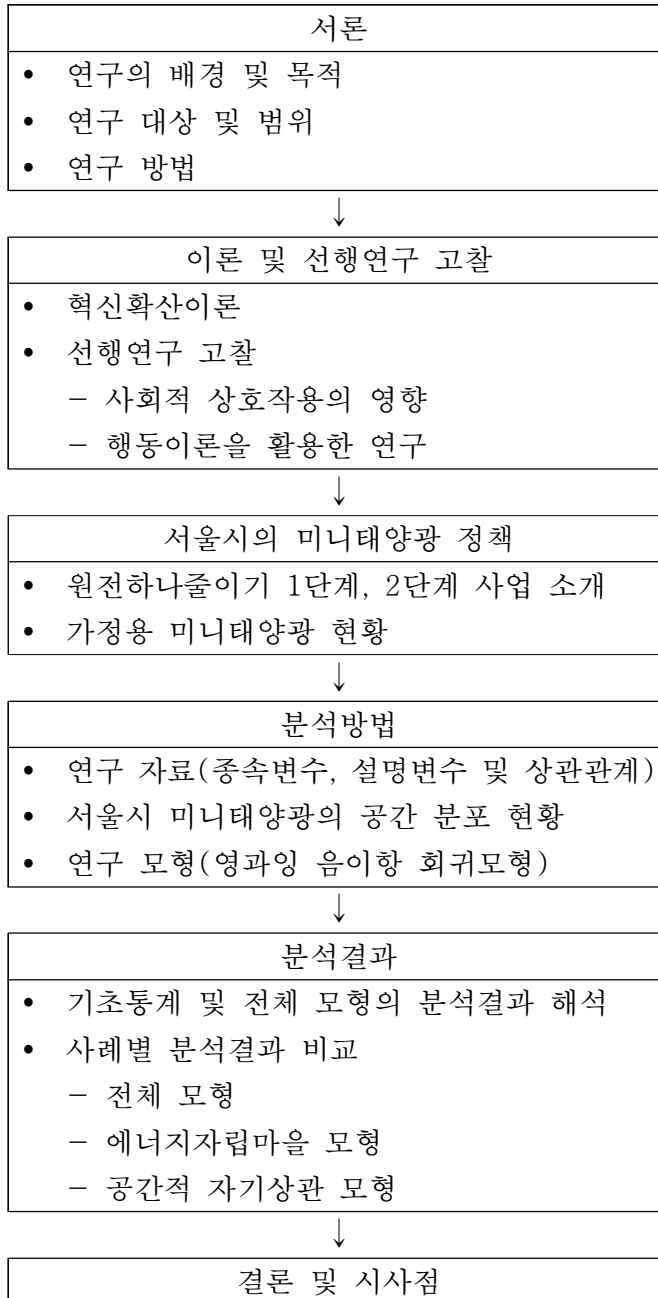
이 연구의 종속변수는 2014년부터 2017년까지의 신규 미니태양광 세대수로 영(0)이 과도하게 많고 오른쪽 꼬리분포로 이산분포하는 가산자료이다. 따라서, 이러한 특성을 분석에 반영하기 위해 영과잉 음이항 회귀모형(zero-inflated negative binomial regression)을 사용한다. 아파트단지와 시간을 고정효과로 적용한다.

본 연구를 분석하기 위해 아파트단지의 인구, 사회, 경제, 건조환경 및 이웃효과 요인을 선정하였다. 인구 요인은 아파트단지의 연령별 인구밀도가 변수이며, 경제 요인에는 자치구 보조금, 아파트단지의 월 평균 전기사용량 및 실거래 평균 평당 단가를 선정하였다. 건조환경 요인에서는 아파트 나이, 세대 평균 면적, 세대수가 변수이다. 이웃효과는 본 연구에서 주목하는 요인으로 공간과 시간에 따른 가정용 미니태양광 확산의 영향력을 사회적 상호작용을 중심으로 살펴본다. Rai·Robinson(2013)은 가정의 태양광 설비를 채택하도록 하는 정보의 확산이 행위자 간 떨어진

거리에 기반하여, 가까울수록 더 영향력이 있음을 밝혔다. 이에 본 연구는 인접한 위치에 설치된 미니태양광 설비가 많을수록 미니태양광 신규설치가 늘어나는지 확인하기 위해 이웃효과 변수를 구성한다. 변수는 전년도까지의 아파트단지 내부 미니태양광 설치밀도, 아파트단지 반경 0-500m, 0-1,000m, 0-1,500m 내에 설치된 미니태양광 설치 세대수의 네 가지 변수로 구성한다.

연구의 분석은 세 단계로 진행한다. 먼저 이 연구의 전체 표본인 서울시 795개의 아파트단지를 대상으로 결과를 도출한다. 그 후 에너지자립마을의 효과를 살펴보기 위해 에너지자립마을에 참여한 아파트단지가 존재하는 10개구와 그렇지 않은 10개구를 분석하여 결과를 비교 검토한다. 마지막으로 서울시 미니태양광의 집계구별 설치밀도를 바탕으로 공간적 자기상관성이 발견되었으므로 그 영향력을 별도로 분석한다. 공간적 자기상관성이 나타나는 핫스팟으로 분류된 5개 구와 그렇지 않은 콜드스팟으로 나타나는 5개 구를 분석하여 결과를 비교한다.

마지막 장에서는 앞에서 도출한 연구의 결과를 요약하고 미니태양광 확산에 관한 정책적인 시사점을 도출하고자 한다. 또한, 연구의 한계를 드러내고 후속 연구의 방향을 논의한다.



[그림 1-1] 연구 흐름도

II. 이론 및 선행연구 고찰

1. 혁신확산이론

혁신확산모델은 1962년에 Rogers에 정립된 이론으로, 한 사회나 조직에서 새롭게 나타난 개혁이 어떻게 확산되어 가는가를 밝혀주는 설득과정 모델을 말한다. Rogers는 1958년에 농촌 지역에서 발생하는 농업 개혁의 확산에 관한 자신의 박사학위 논문을 쓰면서 의학과 교육 분야의 확산 연구가 자신의 연구와 상당히 유사하다는 것을 발견하였다. 그는 농업, 의학, 교육의 확산 연구에서 나타나는 시간 경과에 따른 S자 모양의 채택률, 개인의 혁신 결정 과정에 영향을 미치는 채널, 개혁자들의 성향 등의 공통적인 특성을 바탕으로 혁신 확산이 보편적인 사회변화 과정이라고 주장한다(Rogers, 2005).

Rogers(2005)에 따르면 혁신이 확산될 때, 여러 문화, 다양한 개혁, 그리고 개혁을 채택한 사람들에게서 공통적으로 발견되는 규칙이 있다. 여기에서 확산은 하나의 개혁이 시간이 경과함에 따라 사회체계의 구성원들 사이에서 특정 채널을 통해 커뮤니케이션되는 과정이라고 정의한다. 특히 혁신적인 제품 확산의 채택률과 속도에 있어 커뮤니케이션 전략이 매우 중요하다(Rai-Henry, 2016). 여기에서 커뮤니케이션이란 구성원들 간의 상호 이해를 달성하기 위해 서로 간에 정보를 나누고 생성하는 과정을 말하며, 커뮤니케이션은 어느 정도 동질성을 지닌 사회체계 내에서 일어난다(Rogers, 2005).

확산이론은 다양한 분야와 주제에서 연구가 진행 중이다. 가장 대표적인 사례는 Ryan·Gross(1943)가 아이오와에서 수행한 잡종 옥수수 확산 연구이다. 농촌사회학은 농부를 대상으로 신품종, 비료 등의 확산 과정을 연구한 것으로 전체 확산 연구에 있어 매우 중요한 비율(20%)를 차지한다(Korsching, 2001). 교육학에서는 교육이나 학습 개혁을 위한 연구(김희수 외, 2018; 정바울과 황영동, 2011), 공중보건과 의료사회학에

서는 약, 백신, 가족계획 등에 관한 연구가 개인 혹은 병원을 대상으로 수행되었다(권명순과 장지혜, 2017; Singhal·Rogers, 2003). 그 외에도 커뮤니케이션학에서 사건 및 정책에 대한 연구(이인원과 이영미, 2013; 고재경과 이미홍, 2010; Meseguer, 2005), 마케팅과 경영학에서 신상품 확산에 관한 연구(Valente, 1995; Bollinger·Gillingham, 2012) 뿐만 아니라 공간적 거리의 범위를 중심으로 확산의 정도와 범위를 살펴본 연구(Graziano·Gillingham, 2014; Rode·Weber, 2016)도 있다.

태양광 발전은 지구온난화를 완화하기 위한 목적으로 전력공급의 대안 선택지로 등장하였으며, 전 세계적으로 가장 빠르게 성장하는 발전 기술이다(Gelman and Meshek, 2013; Rai·Robinson, 2015). 특히 가정에서 전력을 생산할 수 있는 가정용 미니태양광에 대한 관심이 늘어가고 있다. 서울은 2014년에 원전하나줄이기 정책의 일환으로 태양광 보급을 시작하였다. 서울시의 가정용 태양광은 시간이 지날수록 널리 확산되고 있는데, 지역에 따라 확산의 정도가 불균형적으로 나타난다. 이는 공간에서 나타나는 동질성과 이질성 때문인데, 이러한 공간적인 특성이 개혁의 확산에 있어 장애 혹은 유인하는 요인이 된다(Rogers, 2005). 공간적인 동질성을 바탕으로 가정용 태양광의 분포 특성을 살펴보는 다양한 연구가 존재한다. 다년간의 패널자료를 구축하여 ZIP code 수준에서 영향력 있는 변수를 살펴본 연구가 있으며(Bollinger·Gillingham, 2012; Kwan, 2012; Richter, 2013; Graziano·Gillingham, 2014), 개인 수준의 인식을 바탕으로 한 연구도 있다(Parkins et al., 2018; Wolske et al., 2017). 최근에는 행위자기반의 네트워크 분석으로 미니태양광의 확산을 설명하기도 한다. 동질성을 가진 개인 혹은 집단을 이어주는 네트워크는 서로에게 매우 강력한 영향을 준다. Rai·Henry(2016)는 사회적 상호작용과 공간적 제한과 같은 복잡한 형태의 에너지 수요를 분석하기 위한 도구로 행위자기반 모형(Agent-Based Model, ABM)을 제안한다. 행위자기반 모형은 다양한 이론을 사용하여 에너지 소비자(가구 혹은 개인)의 행동을 나타낼 수 있으며, 미시적인 수준에서 이질적인 행위자의 상호작용이 지구의 기후와 같은 거시적인 결과에 어떻게 영향을 미치는지 발견할

수 있다. 에너지 수요의 관점에서 에너지 소비자의 행동과 같은 미시적인 행동과 그에 대한 거시적인 결과를 이해함으로써 정책효과를 분석하고 개발하는 데 적절하다는 것이다. 이를 위해 가정용 미니태양광 확산을 사용하여 인접한 행위자 간의 상호작용의 영향을 행위자기반 모형을 통해 확인한다(Rai·Robinson, 2015). 전염병확산이론에서도 이와 같은 동질성 있는 개인 혹은 집단을 매개로 한 확산 과정을 잘 설명하는데, 혁신 확산 과정과 공통점이 많으며 네트워크 모델을 사용하였다(Keeling·Eames, 2005; Kiss et al, 2010).

2. 선행연구 고찰

1) 사회적 상호작용의 영향

사회적 상호작용(social interaction)은 이웃효과(peer effect), 모방행동(imitation)과 무리 행동(herd behavior)이라고 불리며 개인의 행동이 그가 속한 사회적 규범에 영향을 받는 것을 말한다(Manski, 1993; Dharshing, 2017). 혁신 확산의 장으로서 공간에 대한 관심은 지리학에서 시작되었다. 스웨덴 룬드대학교의 Torsten Hägerstrand 박사는 공간적 거리가 어떻게 혁신의 확산에 영향을 주는지 시뮬레이션을 이용하여 접근하기 시작했다. 이웃효과는 그의 모델을 구성하는 중요한 요소 중 하나인데, 단위 시간의 진행에 따라 거리가 가까울수록 혁신이 퍼질 가능성이 높음을 의미한다(Rogers, 2005). 최근에는 거리뿐만 아니라 다양한 공간적인 특성을 토대로 혁신의 확산을 설명한다.

가정용 태양광 확산에 있어서도 이러한 사회적 상호작용의 효과가 발생하는 공간의 특성을 식별하고 가정에서 채택을 결정하는 데 영향을 미치는 속성이 무엇인지 파악하려는 연구가 활발히 이루어지고 있다. Bollinger·Gillingham(2012)는 가정용 태양광 채택에 관해 이웃효과를 가장 먼저 살펴본 연구이다. 미국의 캘리포니아에서 ZIP code를 대상으로 패널 분석한 결과 ZIP code 내에서 가정용 태양광이 한기 추가되면 태양광을 채택할 확률이 0.78%만큼 늘어난다는 것을 밝혔다. 더불어 가구 크기가 크고 통근 거리가 길수록 이웃효과가 더 크게 발생하는데, 가구 크기가 클수록 가정 내 미니태양광을 목격하는 구성원이 많아지기 때문이고, 통근시간이 길수록 출퇴근할 때 길에서 미니태양광을 볼 확률이 높기 때문이다. 이를 통해 시각적인 효과가 설치에 영향을 미쳤을 것이라고 추론한다. 영국에서 post code를 단위로 하여 사회적 상호작용을 살펴본 연구도 있다. Richter(2013)는 영국에서 약하지만 통계적으로 유의한 수준의 사회적 상호작용 효과를 발견하였고, Snape(2016)도 공간 회귀분석을 통해 가정용 태양광 채택률이 만드는 군집을 발견하고, 군집 내에서 시간이 지날수록 채택률이 증가하는 것을 밝혔다. 이는 태양광

채택에 관한 이웃효과와 군집 내 사회적 규범의 영향력을 드러낸다. County를 단위로 공간회귀분석을 수행하여 공간적으로 자기상관성이 있음을 보인 독일의 연구도 있다(Dharshing, 2017).

태양광 설치에 이웃 간의 상호작용이 미치는 거리에 초점을 맞춘 연구도 존재한다. Graziano·Gillingham(2014)은 미국 코네티컷에서의 가정용 태양광의 공간적 분포 특성을 살펴보았다. Census block group 수준을 분석의 단위로 하여 태양광 설비 주위로 반경 0.5, 0.5-1, 1-4마일의 다중 버퍼를 두고 태양광 설치 대수의 증가 데이터를 구축하여 패널 분석을 시행하였다. 분석 결과 0.5마일 내에 1가정이 태양광을 설치하면 평균적으로 0.44 가구에서 태양광 설치가 증가함을 밝혀 이웃효과를 실제적으로 규명하였다. Müller·Rode(2013)는 독일의 Wiesbaden에서 binary 패널 로짓 모델을 사용하여 태양광 설치 위치 간의 실제 물리적인 거리를 사용하여 분석한다. 거리가 줄어들수록 사회적 상호작용의 효과가 강력하게 드러난다. Rode·Weber(2016)는 독일의 전역의 576,000세대의 태양광 설치 자료를 기반으로 전염병 확산모델을 사용하여 사회적 상호작용의 효과를 규명하였다. 태양광 설치 위치에서 반경 0.5km, 1km, 4km 및 10km의 거리에서 나타나는 태양광 채택의 공간적인 효과를 탐색함으로써 효과가 발생하는 실질적인 거리를 확인하였다. 분석결과 공간적인 동질성을 고려하는 것이 태양광 확산의 설명력을 증대시키며, 이러한 모방 행동이 1km 내에서 강력한 영향력을 미친다는 것을 보여주었다.

가정용 태양광의 확산에 있어 인식, 정보격차 및 기술적 불확실성의 비용 절감을 위한 기회를 포착하기 위해 서베이를 기반으로 다변량 회귀분석을 수행한 연구가 있다(Rai·Robinson, 2013). 사회적 상호작용을 다양한 가설을 통해 검증하였는데, 가정용 태양광 구매에 있어 인접지역에 태양광 설비가 많고, 이웃 간 접촉이 있으며, 임대를 통해 경험하는 것이 구매에 긍정적인 영향을 미친다는 것을 발견하였다. Rai·Robinson (2015)은 계획된 행동이론을 통한 태도 및 신념의 영향, 거주지의 가치 및 크기, 일조량과 같은 지리적인 영향과 교육, 인종, 가구크기, 정치적

인 영향 및 거리와 인접한 태양광 설비와의 상관관계를 밝힘으로써 태양광 설치에 영향을 미치는 요인을 다각도로 분석하였다. 그 외에도 서울시의 아파트 단지를 대상으로 에너지절약형 고지서가 가정용 태양광 설치에 미치는 영향을 확인하는 연구에서 이웃효과가 가정용 미니태양광 설치에 영향을 미치고 있음이 발견되기도 하였다(이성재, 2018).

2) 행동이론을 활용한 연구

가정에서 태양광 설비를 채택하는 데 있어 혁신확산이론뿐만 아니라 소비자의 합리적인 행동에 근거한 계획된행동이론(theory of planned behavior) 및 가치신념규범이론(value-belief-norm theory)과 같은 소비자 행동이론으로 결정의 원인을 분석한다. 계획행동이론은 지각된 행동 통제(perceived behavioral control)라는 요인을 강조하며 행위 의도와 실제 행동 사이에 어떠한 조건이 제약을 미친다는 것을 전제한다. 친환경적 가치를 추구할 뿐만 아니라 실행할 만한 능력이 충분한 사람들이 가정용 태양광을 채택하는지에 대한 과정을 설명한다. 한편 가치신념규범이론은 Stern(2000)에 의해 제시된 이론으로 환경적 행동에 있어 이기주의, 이타주의, 생태주의 가치가 행동에 미치는 과정을 설명한다.

먼저, 혁신확산이론을 바탕으로 네덜란드에서 가정용 태양광의 상대적인 이점, 복잡성 및 사회적 상호작용이 소비자의 채택 의도에 어떤 영향을 미치는지 분석한 연구가 있다(Vasseur·Kemp, 2015). 이 연구는 설치에 필요한 비용과 비용에 대한 인식이 채택에 중요한 영향을 미치는 것을 확인했다. Parkins et al.(2018)은 친환경행동의 근본 원인을 가치에 대한 추구로 보며, 이타주의의 중요성을 강조하는 가치신념규범이론을 바탕으로 에너지 시스템에 대한 지식, 에너지 이슈에 대한 대중참여 및 태양광의 시각적 노출과 채택 의도와의 관련성을 분석한다. 재생가능에너지 기술에 대한 지식, 대중참여 정도 및 시각적인 노출이 채택 의도에 상당히 영향을 미치는 것으로 나타난다.

혁신확산이론은 물론 계획된 행동이론과 가치신념규범이론을 통합하여 통합모델을 구축한 뒤 분석한 연구도 있다(Wolske et al, 2017). 혁신확

산이론은 제품에 대한 소비자의 인식, 계획된 행동이론은 소비자의 구매 의사 행동, 그리고 가치신념규범이론은 환경친화적인 소비자 행동을 나타낸다. 따라서 세 가지 이론을 통합하여 분석함으로써 태양광 설비가 가지는 다양한 측면의 이점을 복합적으로 분석하였다.

그 외에도 가치, 태도 및 지식에서부터 경제적 요인에 이르기까지 행동의 내·외부 요인에 초점을 맞춘 연구가 있다. 네덜란드에서 친환경 제품을 채택하는 의도와 관련하여 친환경 제품에 대한 비용적 이점, 사용 용이성 등과 같은 정보의 제공이 친환경 제품에 대한 채택으로 이어진다는 초기연구(Arkesteijn and Oerlemans, 2005)에서부터 호주와 이탈리아에서 태양광 설치에 투자하는 사회 및 심리적인 패턴(Braitto et al., 2017)까지 다양하다. 또한, 대만에서 203명의 대학생을 대상으로 환경가치, 생태적 생활방식, 소비자의 혁신성이 채택의도와 어떤 관련을 가지는지 지역적으로 살펴본 연구(Chen, 2014)에서부터 캐나다 전역에서 2,065명을 대상으로 지역적인 차이를 도출한 연구도 있다(Parkins et al, 2018).

III. 서울시의 미니태양광 정책

1. 원전하나줄이기 정책

서울시는 에너지 위기와 기후변화에 선제적으로 대응하기 위하여 2012년부터 에너지 수요 절감과 신재생에너지 생산확대를 위한 ‘원전하나줄이기’ 종합대책을 시행한다. 2012년부터 2014년까지 시행된 1단계 사업은 총 200만 TOE의 에너지 절감에 성공했다. 그러나 대부분 일시적인 에너지 절약에 의존하고 있고 장기적이고 지속적인 투자가 필요한 에너지 생산 부문의 성과는 매우 부족하다. 에너지 생산 부문에서 41만 TOE의 목표를 설정했지만 실적은 26만 TOE에 불과해 63.4% 달성에 그쳤다. 서울의 전력 소비량이 전국의 10% 정도를 차지하는 데 반해 생산량은 0.4%에 불과하다(이강준, 2015).

구 분	목 표	달 성 성 과			
		계	'12년	'13년	'14년 6월
합 계	2,000	2,040	331	921	788
에너지 생산	410	260	35	78	147
에너지 효율화	1,110	869	145	328	396
에너지 절약	480	911	151	515	245

출처: 서울특별시 원전하나줄이기 시민백서(2017), 단위: 천TOE

[그림 3-1] 원전하나줄이기 1단계의 분야별 목표와 달성 성과

신재생에너지, 그중에서도 태양광을 이용한 전력생산의 확대는 원전하나줄이기 1단계 사업의 중요한 목표 중 하나였다(서울특별시, 2014). 공공건물과 초·중·고교 옥상 등의 공공부문은 물론 민간건물 및 주택 옥상을 활용한 민간시설에 태양광 설비를 추가하여 생산량 증가를 계획했다. 이러한 성과로 13,471kW 규모의 민자 햇빛발전소 17기를 설치했으며,

공공시설의 옥상 등 유휴공간을 활용해 22곳 480kW의 햇빛발전소를 세웠다. 주택 옥상과 지붕을 활용한 태양광 설비도 원전하나줄이기 정책과 함께 급증하기 시작했다. 주택용 태양광 발전시설을 설치하기 시작한 2004년부터 10년간 설치한 총 2,579가구의 54%인 1,396가구가 이 기간에 지어졌다. 아파트 미니태양광은 2013년에 시범적으로 도입된 후 2014년부터 본격적으로 확대 시행되기 시작하였다.

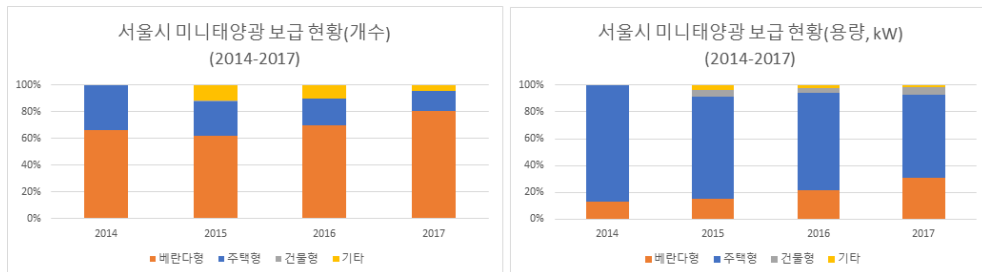
서울시는 현재 ‘원전하나줄이기’ 2단계 사업(2014년~2020년)을 실행 중이다. 2단계 사업을 시작하면서 에너지정책의 실효성 및 사업의 집행성 제고를 위해 서울에너지공사를 설립한다. 서울에너지공사는 집단에너지 공급 확대, 신재생에너지 확대 보급, 에너지 효율화, 지역 및 시민협력, 경영의 내실화의 5대 전략을 바탕으로 미활용에너지 이용, 에너지 복지 확대, 온실가스 배출 감축의 2020목표를 추진하고 있다. 특히 가정용 미니태양광 설치를 위한 원스탑 서비스를 제공하고 있다.

태양광 설비의 보급은 서울시의 에너지 생산 계획의 중요한 부분을 차지한다. 그중에서도 가정용 베란다형 미니태양광은 기존 주택 태양광에 비해 모듈과 인버터의 크기가 작아 아파트 베란다와 같은 작은 공간에서도 쉽게 설치할 수 있는 장점이 있어 널리 이용되고 있다(서울특별시, 2017a).

2. 가정용 미니태양광 현황

[그림 3-2]는 2014년부터 2017년까지의 서울시 미니태양광 보급현황을 보여준다. 설치개수 측면에서 베란다형 미니태양광의 증가가 눈에 띈다. 물론 발전 용량 측면에서는 200~1,000W 용량의 베란다형 미니발전소의 총 용량이 3kW 내외 용량이 설치되는 주택형 발전소에 크게 미치지 못다. 그러나 베란다형 미니발전소의 증가추세로 볼 때, 에너지 수요관리를 지원하는 첨병 역할을 할 수 있으리라 기대할 수 있다. 이에 서울시는 2017년 11월에 2022년까지 원자력 발전소 1기 설비 용량과 같은 1GW규모의 태양광을 보급하겠다는 “태양의 도시, 서울” 프로젝트를 선언한다. 그중에서 미니태양광은 2022년까지 총 605,185가구에 보급할 계획이며, 2018년 10월 기준 40,061가구에 보급하여 계획했던 52,625가구 대비 76.13%의 목표를 달성하였다(이재석, 2018a).

가정용 미니태양광은 설치한 시민들에게도 몇 가지 이점을 제공한다. 먼저 경제적으로 이득이 있다. 서울시는 가정용 미니태양광의 확산을 유도하여 소비자로 하여금 원금 회수 기간을 줄일 수 있도록 보조금을 지급하고 있으며, 자치구에서도 별도의 보조금을 지급하여 소비자는 최대 약 75%의 보조금을 받고 설치할 수 있다(이성재, 2018). 이재석(2018b)에 따르면 서울시에서 미니태양광을 설치한 가정의 자본 회수 기간은 2.31년(260W) 및 2.89년(300W)이며, 경제적 순이익은 285,896원(260W) 및 321,087원(300W)으로 나타나 경제성이 충분한 것으로 드러난다. 더



출처: 서울시 내부자료

[그림 3-2]. 서울시 미니태양광 보급률

불어 미니태양광을 설치한 시민들의 에너지 시민성을 고취 시킨다. 미니태양광 보급률이 높은 노원구를 대상으로 한 연구에 따르면, 미니태양광 사용 만족도에 있어 전반적으로 만족한다는 응답이 많았으며, 만족의 가장 큰 요인은 재생가능에너지 생산에 따른 자긍심이었다(백중학·윤순진, 2015).

미니태양광 확산에 있어 자치구의 의지는 보급 확산에 중요한 역할을 한다. 자치구의 의지에 따라 보조금의 규모와 임대 아파트에 강제로 설치되는 규모가 다르기 때문이다. [표 3-1]은 2014년부터 2018년까지의 자치구별 보조금 지원현황을 보여준다.

그러나 자치구별 또는 자치구 내 미니태양광의 설치밀도는 보조금의 영향력 이외에 다른 요인이 확산에 영향을 미치고 있음을 보여준다. [그림 3-3]에 따르면 은평구의 아파트 가구당 설치밀도가 가장 높고, 양천구, 도봉구, 노원구, 마포구가 뒤를 따른다. 은평구의 높은 미니태양광 설치밀도는 도시재생사업에 의한 개입 때문이라고 추정할 수 있다. 지역을 좀 더 세부적으로 들여다보면, 자치구 내에서도 행정동 별로 설치밀도에 차이가 발생한다. [그림 3-4]는 노원구의 행정동별 미니태양광 설치밀도를 보여주며, 행정동별로 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 아파트단지 수의 차이라고 하기에는 설치밀도가 낮은 중계2,3동에 중계무지개2단지(2,433세대), 중계그린아파트(3,481세대) 등의 아파트가 위치해 있으며, 상계3,4동(불암현대아파트, 826세대 등) 및 상계5동(상계벽산아파트, 1,590세대 등)에도 대단지의 아파트가 존재한다. 이는 지역에 따

[표 3-1] 자치구별 보조금 지원 현황

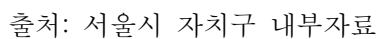
보조금	2014년	2015년	2016년	2017년
5만원	노원	노원	강동, 노원, 동작	강동, 강북, 노원, 송파
7만원	-	-	-	강서
10만원	-	구로, 송파, 양천, 중구	구로, 도봉, 동대문, 마포, 서대문, 서초, 성동, 송파, 양천, 영등포, 중구	강남, 관악, 광진, 구로, 금천, 도봉, 동대문, 동작, 마포, 서대문, 서초, 성동, 성북, 양천, 영등포, 은평, 중구, 중랑

출처: 이재석(2018a), 이성재(2018)를 재구성

(개/원가구)

지역	개/원가구
서울	47
부산	34
대구	33
인천	32
대전	31
광주	30
울산	29
경북	28
충북	27
전북	25
경남	25
충남	23
전남	22
경서	20
경북	18
경남	18
전북	17
전남	16
경북	14
전북	14
경북	9
경북	8
경북	6
경북	2

[그림 3-3] 자치구별 미니태양광 설치 밀도(2017년)



– 19 –

IV. 분석 방법

1. 연구 자료

이 연구의 분석단위는 서울시 아파트단지로 2014년부터 2017년까지의 분양 아파트단지를 모집단으로 한다. 아파트 자료를 구축하기 위해 공동주택관리정보시스템(K-apt)¹⁾의 데이터를 활용했으며, 2017년을 기준²⁾으로 총 2,038개의 아파트단지 정보를 수집했다. 추출된 아파트단지의 총 세대수는 1,210,262세대로 집계된다. 이 연구의 목적인 아파트 미니태양광 설치에 영향력 있는 요인이 무엇인지 살펴보기 위해 선행연구를 바탕으로 인구, 경제, 건조환경, 사회 및 이웃효과 요인으로 구분하여 변수를 선정하였다. 인구 변수는 연령별 인구밀도, 경제 변수는 자치구 보조금, 아파트단지의 평균 전기사용량 및 실거래 평당 단가이다. 건조환경 변수는 건축물 나이, 세대 평균 면적, 아파트단지의 세대수를 선정하였으며, 사회변수는 자치구의 ICLEI 가입여부, 지자체장의 정치성향 및 각 아파트단지의 에너지자립마을 참여 여부이다.

아파트단지의 표본은 결측값이 발생한 경우를 제외하고 총 795(39.0%)개의 아파트단지를 표본으로 선정하였다. 자료는 2014년부터 2017년까지 연속적인 패널자료로 구성된 균형 패널자료이다. [표 4-1]과 같이 서울시 25개 구에서 적절한 비율로 추출되었다.

-
- 1) 공동주택관리정보시스템(K-apt)이란 공동주택 관리비의 투명성 제고 및 건전한 관리문화 정착을 도모하기 위해 의무관리대상 공동주택의 관리비, 유지관리이력, 입찰정보, 회계감사보고서 등 공동주택관리 정보를 공개하고 전자입찰을 운영하는 시스템을 말한다. 이 시스템에서 관리하는 대상 단지는 공동주택관리법 시행령 제2조에 따라 의무관리대상인 공동주택으로 300세대 이상 공동주택, 150세대 이상으로서 승강기 또는 중앙(지역)난방방식 공동주택, 주택이 150세대 이상인 주상복합 아파트이다.
 - 2) 2014년에서 2017년까지 연속적으로 존재하는 아파트를 대상으로 하였다. 이를 토대로 강한 균형패널 자료를 구축하였다.

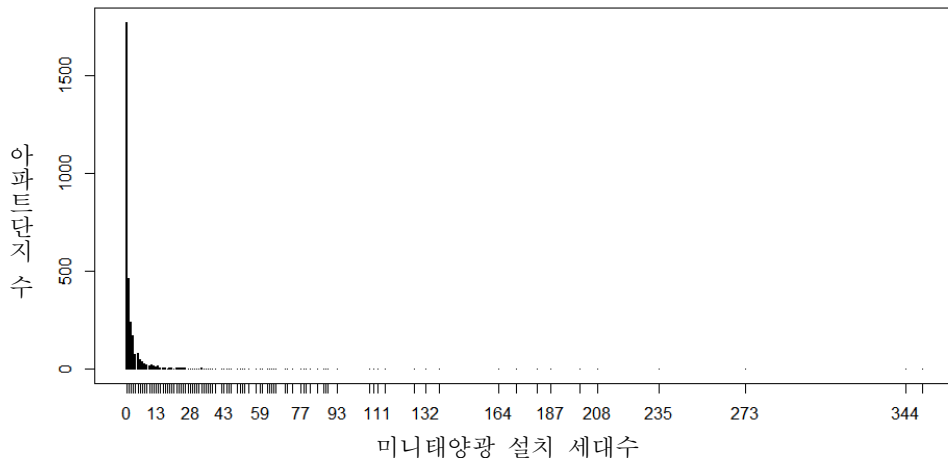
[표 4-1] 자치구별 표본 크기

구	단지수 (K-apt)	세대수 (K-apt)	표본	
			단지	세대
종로구	15	7,382	5 (33.3%)	3,038
중구	15	14,109	6 (26.7%)	4,246
용산구	50	24,656	18 (36.0%)	13,638
성동구	80	45,113	25 (31.3%)	19,366
광진구	53	22,230	16 (30.2%)	9,989
동대문구	73	41,111	28 (38.4%)	23,930
중랑구	71	36,809	22 (31.0%)	17,872
성북구	102	62,842	52 (51.0%)	47,177
강북구	38	28,070	11 (28.9%)	12,728
도봉구	90	58,130	49 (54.4%)	45,369
노원구	182	145,842	90 (49.5%)	93,813
은평구	83	31,465	19 (22.9%)	9,731
서대문구	59	32,247	24 (40.7%)	17,769
마포구	89	46,519	28 (31.5%)	15,029
양천구	97	65,021	35 (36.1%)	42,254
강서구	132	75,873	46 (34.8%)	35,443
구로구	106	55,334	50 (47.2%)	34,924
금천구	30	17,277	10 (33.3%)	9,242
영등포구	124	52,746	44 (35.5%)	28,316
동작구	78	39,189	35 (44.9%)	25,275
관악구	56	40,815	16 (28.6%)	23,961
서초구	104	31,868	27 (26.0%)	20,082
강남구	133	91,343	65 (48.9%)	60,611
송파구	106	93,845	48 (45.3%)	65,071
강동구	72	50,426	28 (38.9%)	22,776
합계	2,038	1,210,262	795 (39.0%)	706,836

1) 종속변수

이 연구의 종속변수는 2014년부터 2017년까지 서울시 795개 아파트 단지의 연도별 미니태양광 신규 설치 세대수³⁾이다. 이 자료는 음수가 없는 정수값을 가지는 가산자료로 정규분포하지 않고 이산분포하는 것이 특징이다. 종속변수가 이산분포하는 가산자료일 때, OLS로 분석하면 설명변수의 계수 값에 편의가 발생할 수 있다(Wooldridge, 2006). 이에 본 연구에서는 가산자료인 종속변수를 분석하기에 적합한 포아송 회귀모형(Poisson regression)을 사용한다. 포아송 회귀모형은 평균과 분산이 같을 때 사용할 수 있다. 종속변수의 평균과 분산을 확인한 결과 평균은 3.92, 분산은 288.30으로 산출되어 포아송 회귀모형을 사용하기 위한 가정을 위배한다. 이와 같이 자료가 과분산(Overdispersion)하게 되면 일치추정량을 가질 수 없으므로 음이항 분포(Negative binomial distribution)를 활용한 회귀모형을 사용해야 한다(Cameron·Trivedi, 2013).

[그림 4-1]은 미니태양광 설치 세대수별 아파트단지 수를 보여준다. 아파트단지의 총합은 표본인 795개의 아파트단지의 4년간의 자료인 3,180



[그림 4-1] 미니태양광 설치 세대수별 아파트단지 수

3) 자료는 정보공개 포털을 통해 서울시 25개 구에 각각 요청하여 구득하였으며, 아파트 단지의 주소는 지오코딩으로 일치시켜 다른 변수와 매칭할 수 있었다. 지오코딩은 다음의 웹사이트에서 수행하였다. <http://geocoding.co.kr/xga/index.jsp>

개이다. 미니태양광이 전혀 설치되지 않은 아파트단지는 총 1,175개 단지로 전체의 약 36.95%를 차지한다. 이처럼 영(0)이 과다하게 관측될 경우 자료의 분석을 위해 다른 접근방법이 필요하며, 영과잉 회귀모형 (Zero-inflated regression)을 고려하는 것이 적절하다.

2) 설명변수

(1) 인구

Rogers(2005)는 혁신확산이론을 정립하면서 나이와 혁신을 채택하는 의도 사이에는 관계가 없다고 이야기한다. 반면, 어릴수록 새로운 기술을 더 잘 받아들이는 경향이 있음을 밝힌 연구가 있다(Morris and Venkatesh, 2000; Lee et al., 2003). Mills-Schleich(2012)도 유럽의 11 개국을 대상으로 연구한 결과 노인 가구가 에너지 효율이 낮은 기술을 채택하는 경향이 있으며, 이는 교육수준이 낮고 에너지 절약 및 최신 기술에 대한 정보 접근성이 낮기 때문이라고 주장한다. 이와 비슷하게 Kellstedt et al.(2008)도 나이가 많은 사람들이 젊은 사람들에 비해 지구 온난화나 환경적인 이슈에 관심이 덜 하다고 말한다. 가정용 태양광 설비의 채택에 있어서도 나이에 관심을 둔 연구가 있다. 캐나다의 연구에서는 어릴수록 가정용 태양광 채택 의도에 긍정적인 영향을 미치는데, 이는 환경적 가치와 정치참여와 관련이 있는 것으로 나타난다(Parkins et al., 2018). 반면, 미국에서는 다른 결과가 도출되었다. 가정용 태양광 마케팅 분야의 연구에 따르면 20-45세, 65세 이상에서 낮은 채택률을 보였다(Bollinger·Gillingham, 2012). 비슷하게 40대에서 가정용 태양광 채택률이 높게 나온 연구가 있지만(Zahran et al., 2008; Kwan, 2012), 유의하게 도출되지 않은 연구도 있다(Graziano·Gillingham, 2014). 한편 개발도상국인 스리랑카의 연구에서도 중년(40-49세)이 태양광 채택에 긍정적인 상관관계가 있다고 도출되지만, 40대 미만에서 채택률이 낮은 이유를 설치 초기비용을 감당하지 못하기 때문이라고 추정한다(Jayaweera et al, 2018). 지금까지의 논의를 종합하면, 가정용 태양광 채택 의도에 있어 나이는 지역과 상황에 따라 다른 결과가 도출된다고 볼 수 있다. 나이는 가장 대표적인 인구 변수로 나이에 따른 경향을 알 수 있다면 효과적인 정책을 입안하는 데 도움이 된다. 이에 본 연구에서도 나이를 변수로 채택한다. 아파트 단지별로 나이별 인구를 구축하기 위해 대시메트릭 매핑 기법⁴⁾을 사용한다.

(2) 사회

사회적 영향력을 확인하기 위해서는 자치단체장의 정치성향, ICLEI 가입 여부 및 에너지자립마을 참여 여부를 변수로 취급한다. 자치단체장의 정치성향⁵⁾은 지자체장이 속한 정당을 적용한다. 이는 기초지자체의 가정용 미니태양광 보급 의지와 자치구민의 평균적인 정치성향을 대리한다고 할 수 있다. 선행연구에 따르면 진보정치성향을 가진 사람이 환경적 가치에 더 관심을 많이 가지며(Liere and Dunlap, 1980; Leiserowitz, 2006), 미니 태양광 채택에 있어서도 진보정당이 우세한 지역에서 보다 많이 설치하고 있다(Parkins et al., 2018). ICLEI에 가입한 기초지자체⁶⁾가 에너지를 절약한다는 연구(김민수, 2017)에 따라 미니태양광 보급에도 적극적일 것이라고 추정할 수 있다. 이에 자치구의 보급 의지를 대리하는 변수로 채택한다. 이성재(2018)는 아파트 고지서로 인한 태양광 설치 영향을 확인하는 연구에서 에너지자립마을 참여가 미니태양광 설치에 긍정적인 영향을 주는 요소라는 것을 밝혔다. 마을 공동체의 다양한 활동과 보조금 지원의 효과로 볼 수 있다. 서울시의 에너지자립마을은 2014년(15개소), 2015년(29개소), 2016년(45개소), 2017년(58개소)로 꾸준히 늘어났다.

4) 대시메트릭 매핑 기법은 임의적인 공간을 기준으로 집계된 인구학적 데이터를 연관된 공간적 보조 데이터를 사용하여 더 세밀한 밀도 분포를 재현하는 방법이다. 본 연구에서는 이석준 외(2014)에 의해 제안된 대시메트릭 매핑 기법을 적용한다. 인구분포 모델을 도출하기 위해 바이너리 기법, 연면적 적용기법, 회귀분석 기법이 차례로 적용되었다.

5) 2014년부터 2017년까지 서울시 기초자치단체장의 정치성향은 아래와 같다.

- 보수정당: 중구, 중랑구, 서초구, 강남구, 송파구 5개구
- 진보정당: 상기 외 20개 자치구

6) ICLEI에 가입한 기초지자체는 다음과 같다.

	2014년	2015년	2016년	2017년
ICLEI 가입 기초지자체	종로구, 성북구, 서대문구, 강동구	종로구, 성북구, 서대문구, 강동구, 도봉구, 노원구	종로구, 성북구, 서대문구, 강동구, 도봉구, 노원구, 은평구	종로구, 성북구, 서대문구, 강동구, 도봉구, 노원구, 은평구, 송파구

(3) 경제

서울시는 미니태양광 채택을 장려하기 위한 경제적 유인 정책으로 보조금을 지급하고 있다. 가정용 태양광 설치 시 지급되는 서울시와 자치구의 보조금이 채택을 결정하는 데 중요한 영향을 미치는 요소라고 알려져 있다(백종학·윤순진, 2015; 이성재, 2018). 이에 자치구의 보조금을 변수로 채택한다. 보조금을 지원하는 자치구는 1(2014년), 5(2015년), 14(2016년), 25(2017년)개 구로 증가하였다.

가정용 태양광 설치와 소득수준에 관한 다양한 연구가 존재한다. 과거에는 소득이 높을수록 태양광을 더 많이 설치했지만(Lam, 1998), 최근 연구에서는 소득이 낮은 수록 태양광을 더 많이 설치하는 것으로 나타난다(Bollinger·Gillingham, 2012; Müller·Rode, 2013). 이 연구에서도 소득이 가정의 미니태양광 설치에 미치는 영향력을 살펴보기 위해 전기소비량 및 아파트 실거래 평당 단가를 가계소득의 대리변수로 활용하여 그 영향력을 살펴본다. Rodriguez-Oreggia·Yepez-Garcia(2014)는 도시지역에서 소득의 증가가 에너지 소비 증가에 긍정적인 영향을 미치는 것을 밝혔다. 그러나 일각에서는 소득수준이 에너지 소비에 유의미한 영향을 미치지 않는 것으로 나타난다(Soytas et al., 2007). 이성재(2018)의 연구에서도 전력소비량이 낮을수록 설치율이 높은 것으로 나타난다. 이와 같이 소득과 에너지 소비는 분석범위와 시간에 따라 다양한 해석이 가능하다. 전기소비량은 아파트단지의 당해연도 평균 사용량을 산출하여 사용하였다. 더불어 전기소비량에 대한 편의를 줄이기 위한 목적으로 오피스텔 혹은 주상복합은 분석에서 제외하였다. 상가에서 사용하는 전기 및 가스사용량이 포함되어 가정의 소비량을 과다 추정할 수 있기 때문이다.

(4) 건조환경

Snape(2016)는 농촌에 비해 대도시가 태양광 기술의 채택률이 낮다는 것을 발견했다. 이는 대도시에는 아파트와 같은 고층건물이 밀집해 있어 인구밀도가 높는데 태양광 설비를 설치할 수 있는 공간에는 한계가 있기 때문이라고 지적한다. 서울시는 전 세계에서 손꼽히는 고밀한 도시이며,

아파트를 주요 대상으로 하는 미니태양광 보급 정책을 펴고 있다. 본 연구는 이러한 서울시 특성에 맞춰 아파트를 분석대상으로 진행하는바 선행연구와 차별점을 가진다. 이 연구는 아파트가 밀집한 고밀한 도시의 재생가능에너지 잠재력을 살펴볼 수 있는 또 다른 함의를 가진다.

아파트단지가 클수록 혁신을 채택하는 ‘개혁성’을 지닌 개인이 많을 확률이 높으므로 자연스럽게 신규 설치가 많아질 수 있다. 이에 아파트 단지의 규모를 통제하지 않으면 결과에 왜곡이 있을 수 있다. 따라서, 아파트단지의 세대수를 아파트단지 규모를 대리하는 변수로 선정하여 모형에 추가하였다. 더불어 그 외 건물의 특성에서 나오는 영향력을 통제하기 위해 건물 나이를 변수로 선정하고, 추가적으로 세대 평균 주거 밀도를 변수로 선정하였다.

아파트단지의 종류는 분양 아파트만 대상으로 하였다. 일부 자치구에서 원전하나줄이기 정책 및 지자체장의 의지에 따라 2015년부터 임대아파트 내 저소득 가구에 미니태양광을 무료로 설치하고 있다. 이 논문은 아파트단지의 주민 사이에서 발생하는 사회적 상호작용에 초점을 맞추고 있으므로 이러한 정책효과가 반영될 경우 결과가 과소 혹은 과대 추정될 가능성이 있다. 따라서, 임대 혹은 임대와 분양이 함께 있는 아파트단지는 분석에서 제외하였다.

(5) 이웃효과

이 연구는 아파트 미니태양광 보급 확산에 있어 기존에 가정용 태양광을 설치한 가구에 의한 사회적 상호작용의 영향력에 초점을 맞춘다. 아파트 미니태양광 보급에 있어 사회적 상호작용은 두 가지 효과, 먼저 설치한 이웃의 추천으로 미니태양광을 설치하는 입소문에 의한 효과와 주변에 설치된 미니태양광을 보고 관심을 갖게 되어 설치까지 이르게 되는 시각적인 효과를 생각할 수 있다. 혁신의 채택 및 확산에 대한 사회연결망 접근에 따르면 이웃 간 우정, 조언 및 지원이 확산에 중요한 요소이며(Valente, 1996), 아파트는 다양한 커뮤니티 활동을 통한 사람들 간 교류가 활발하게 일어나는 곳이다. 이성재(2018)는 서울시 아파트단지를

대상으로 하는 연구에서 아파트단지 내 미니태양광 확산의 이웃효과가 존재함을 밝혔다.

다음으로 인접한 위치에 설치된 미니태양광의 시각적인 효과를 고려하였다. Arkesteijin·Oerlemans(2005)는 혁신 기술의 채택이 사회적 그리고 제품의 시각적인 효과와 밀접하게 관련이 있다고 말한다. 가정용 태양광 채택에 있어서도 시각적인 효과가 확산에 긍정적인 영향을 미친다(Parkins et al, 2018; braito et al, 2017, Bollinger·Gillingham, 2012). 본 연구에서는 이 효과를 실증분석하기 위해 도시 설계 및 계획, 교통, 지리, 보건 및 공간 분야에서 다양한 연구(Zenk et al., 2011; Chen et al., 2017; Dobra et al., 2017)가 이루어지는 활동공간(activity space)에 기반하여 미니태양광 확산의 정도를 확인한다. 활동공간(activity space)은 사람들 사이에 사회적인 영향력이 발생하는 공간으로, 공간 특성에 따른 사회적 및 환경적 위험 요인에 대한 개인의 영향을 평가하는 기본적인 단위를 이룬다(Chen·Dobra, 2017). 일반적으로 개인의 활동을 위한 일상 환경의 일부로 정의하며(Golledge·Stimson, 1997; Schönfelder·Axhausen, 2003), 크게 주거지역, 쇼핑 및 통근통학과 같은 정기적인 통행이 이루어지는 공간과 그 외 일상에서 이루어지는 공간의 세 가지 종류로 구분한다(Golledge·Stimson, 1997).

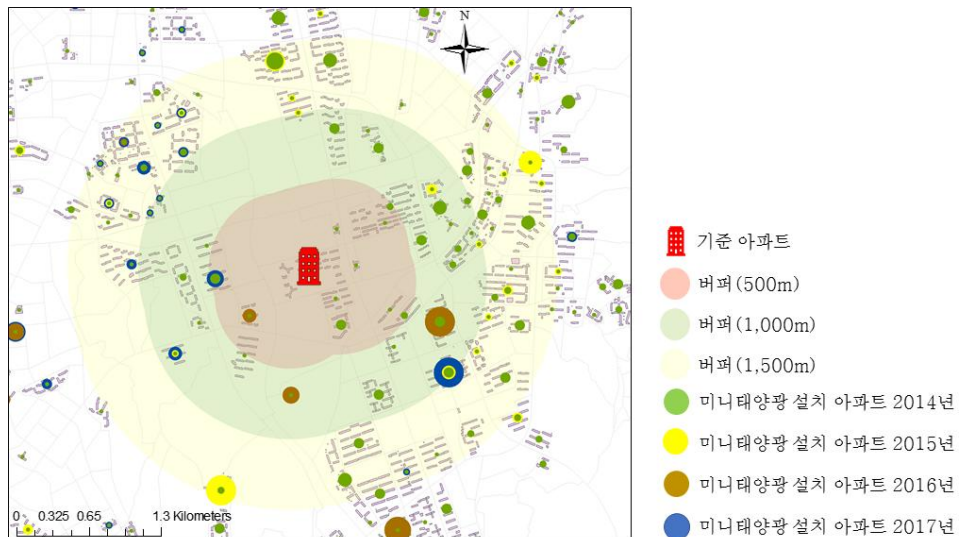
이 연구는 가정용 미니태양광 확산을 살펴보는 것이 주요한 목적이므로 주거지를 중심으로 한 미니태양광 확산 범위에 관심이 있다. 미니태양광의 확산에 있어 사람들은 통행, 산책 등을 통해 기존에 설치된 미니태양광을 목격한다. 사회적 규범 이론에 따르면 사람들은 다른 사람들의 행동 혹은 태도에 영향을 받아 사회적 규범을 따르는 경향이 있으며(Frederiks et al., 2015), 가정용 미니태양광 채택에 있어서는 주변에 설치된 미니태양광을 목격한 사람들이 신규 설치자가 되는 현상으로 설명 가능하다. 본 연구에서는 이를 미니태양광의 시각적인 효과로 설정하고 인접한 위치에 미니태양광이 많을수록 신규 설치자가 증가할 것이라는 가설을 실증적으로 규명한다.

영향력이 이루어지는 공간의 범위를 설정하기 위해 선행연구를 살펴보

았다. 활동공간의 범위는 다양하게 적용되고 있다. Zenk et al.,(2011)은 주거 지역의 환경 특성과 체중 간의 상관관계를 보는 연구에서 활동공간을 거주지 반경 0.5mile로 설정하였다. 또 다른 연구에서는 도보로 15분 떨어진 거리를 의미하는 거주지 반경 1,000m를 활동공간으로 적용하였으며(Chaix et al., 2014; Villanueva et al., 2014), Perchoux et al.,(2016)는 거주지와 직장(1,000m), 여가 및 사회 활동(500m), 서비스 활동(200m)의 다층 구조로 적용하여 영향력의 정도를 살펴보았다. 미니태양광 확산의 공간분포 특성을 살펴본 연구에서도 태양광 설비 주위로 반경 다중 버퍼를 사용하여 거리에 따른 영향력의 정도를 살펴보았다. Graziano·Gillingham(2014)는 태양광 설비 반경 0.5, 0.5-1, 1-4마일을 이웃확산을 보기 위한 버퍼로 설정하였는데, 0.5마일 내에서 유의하게 도출되었다. Rode·Weber(2016)는 반경 0.5km, 1km, 4km 및 10km를 영향력의 범위로 설정하였고, 1km에서 강력한 영향력이 있음을 밝혔다. Rai·Robinson(2015)은 태양광이 설치된 가정 주위에 100ft(30.5m) 간격으로 10,000ft(3,050m)까지의 거리별 영향력을 살펴보았는데, 2000ft(610m)에서 상관관계가 가장 크게 도출되었다.

이러한 배경을 바탕으로 본 연구에서는 아파트단지 내 및 아파트단지 간에 발생하는 이웃효과를 고려하기 위해 네 가지 변수를 선정하였다. 먼저 아파트단지 내 이웃효과를 포착하기 위한 방법은 2014년부터 2017년까지 전년도까지의 누적 설치밀도를 반영하는 것이다. 미니태양광 보급 정책이 2014년부터 본격적으로 시행되었으므로 이 변수의 2014년도 값은 모두 0으로 표기된다. 2015년의 값은 아파트 총 세대수 대비 2014년도에 설치된 미니태양광 세대수, 2016년도에는 2014년과 2015년에 설치된 누적 세대수, 2017년도에는 2014년부터 2016년까지 설치된 누적 세대수이다. 밀도변수로 반영하여 아파트단지의 크기를 통제하고 더 조밀하게 설치되어 있는 미니태양광의 시각적인 효과를 반영할 수 있다. 아파트단지 간에 발생하는 이웃효과를 확인하기 위해서는 아파트단지를 중심으로 하는 활동공간, 즉 반경 1,000m를 적용하는 것이 적합해 보인다. 다만, 대부분의 선행연구에서 사용된 분석대상은 대부분 단독 혹은

소형 주택을 대상으로 한 연구였으며 우리가 아는 한 아파트단지를 대상으로 아파트단지 간 사회적 상호작용의 범위를 살펴본 연구는 없다. 따라서, 이 연구에서는 500m, 1,000m, 1,500m를 버퍼로 설정하여 거리에 따른 영향력의 정도를 살펴본다. ArcGIS(ver.10.1)를 이용하였으며, 아파트단지를 중심으로 500m, 1,000m, 1,500m 버퍼를 설정한 뒤 해당 버퍼 내 아파트단지에 설치된 미니태양광 개수를 추출하였다. [그림 4-2]는 인접한 아파트단지에 설치된 미니태양광을 추출하기 위한 과정을 보여준다.



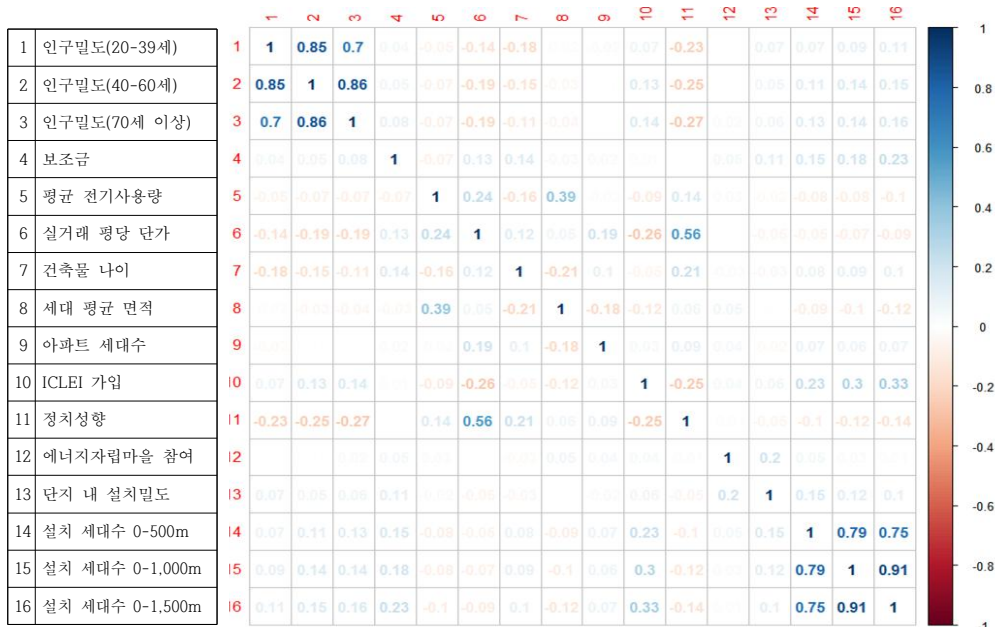
[그림 4-2] 인접한 미니태양광 개수 추출 과정

[표 4-2] 분석에 사용한 변수 설명 및 출처

변수	변수 설명(단위)	출처
종속변수		
미니태양광 신규 설치 세대수	아파트단지별 미니태양광 설치 신규 세대수(세대)	서울시 25개 구청
독립변수: 인구(인/ m^2)		
인구밀도(20-39세)	아파트단지의 20-39세 인구밀도	국토지리정보원 국토정보플랫폼
인구밀도(40-69세)	아파트단지의 40-69세 인구밀도	
인구밀도(70세 이상)	아파트단지의 70세 이상 인구밀도	
독립변수: 경제		
보조금	자치구 보조금(만원)	이재석(2018a), 이성재(2018)
평균 전기사용량	아파트단지의 월 평균 전기사용량(kWh)(log)	건축데이터 민간개방시스템
실거래 평당 단가	아파트단지의 실거래 평당 단가(백만원)(log)	서울 부동산정보광장
독립변수: 건조환경		
건축물 나이	연도별 아파트단지 나이(건축연도-해당연도)(년)	국가공간정보포털 · GIS
세대 평균 면적	아파트단지 세대 평균 주거면적(m^2)(log)	· 공동주택관리 정보시스템
아파트 세대수	아파트단지 세대수(백세대)	
독립변수: 사회		
ICLEI 가입	자치구의 ICLEI 가입여부 (0=미가입, 1=가입)	ICLEI 한국사무소
정치성향	자치단체장 소속 정당 (0=진보정당, 1=보수정당)	각 구청 홈페이지
에너지자립마을 참여	아파트단지의 에너지자립마을 참여여부 (0=미참여, 1=참여)	서울시 정보소통광장
독립변수: 이웃효과		
단지 내 설치 밀도	아파트단지 내 전년도까지의 미니태양광 누적 설치밀도 (설치세대수 / 총세대수)	서울시 25개 구청
설치 세대수 0-500m	아파트단지 반경 0-500m, 전년도까지의 미니태양광 누적 설치 세대수	
설치 세대수 0-1,000m	아파트단지 반경 0-1,000m, 전년도까지의 미니태양광 누적 설치 세대수	
설치 세대수 0-1,500m	아파트단지 반경 0-1,500m, 전년도까지의 미니태양광 누적 설치 세대수	

3) 상관계수 분석

[그림 4-3]은 본 연구에서 사용한 설명변수들의 상관관계를 분석한 결과를 보여준다. 인구 변수(1-3번) 및 이웃효과 변수(14-16번) 간에 상관계수가 높게 나타나며, 그 외 변수 간의 상관계수는 적절한 편이다. 인구 변수의 경우 각 아파트단지에 거주하는 사람들의 연령별 인구밀도이므로 변수의 구성단위가 같아 상관관계가 높게 나타날 수 있다. 그러나 이 연구에서 연령별 신규 설치의 영향력을 확인하고 싶으므로 모형에 모두 포함한다. 반면, 이웃효과 변수의 경우 아파트단지에서부터 반경 500m, 1,000m, 1500m까지의 전년도까지의 누적 설치 세대수로 구성되어 있으므로 중복되는 거리만큼 미니태양광을 설치한 세대수가 중복되어 있다. 이 변수들이 강한 상관관계를 보여 결과를 왜곡할 수 있으므로 아파트단지 반경 0-1,500m까지의 변수를 포함했을 때와 포함하지 않았을 때의 결과를 비교하도록 한다.



[그림 4-3] 설명변수 간 상관관계

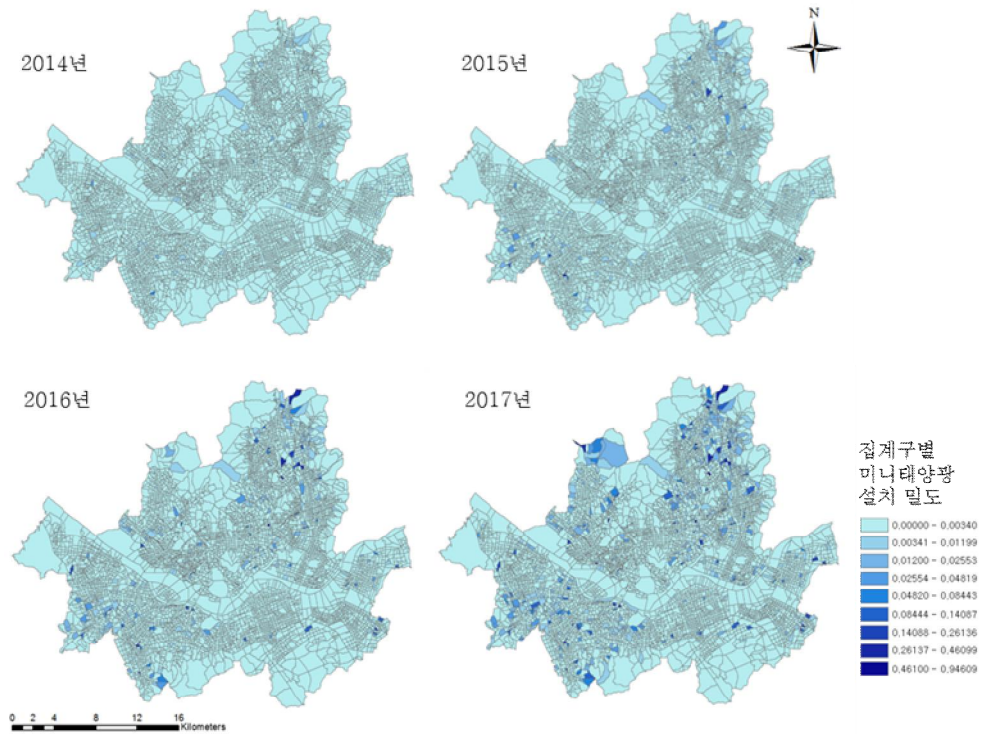
2. 서울시 미니태양광의 공간분포 현황

Hägerstrand(1952)는 혁신이 확산되는 과정을 연구하며 새로운 기술의 확산이 인구밀도가 높은 지역을 중심으로 파도 형태와 같이 퍼져나간다고 말한다. 이때 혁신을 상대적으로 빠르게 채택하는 ‘개혁성’을 지닌 개혁자와 혁신 채택에 따르는 불확실성이 완전히 배제되길 기다리는 ‘전통적인 비개혁자’ 사이에 혁신을 받아들이는 속도 차이가 발생한다. 여기에 더해 혁신을 받아들인 채택자를 중심으로 이웃효과가 발생하여 인접한 사람들에게 새로운 기술이 보다 빨리 전파된다(Rogers, 2005). 이러한 과정을 거치다 보면 서로 간의 속도 차이에 의해 혁신을 빠르게 받아들이는 집단과 그렇지 못한 집단이 구분되어 군집이 형성될 수 있다.

선행연구에 따르면 가정용 태양광 설비의 채택은 지역적으로 어느 정도 군집을 이룬다(Graziano·Gillingham, 2015; Basic-Sontic·Fuerst, 2018; Dharshing, 2017). [그림 4-3]은 서울시의 연도별 가정용 미니태양광 분포이다. 아파트별로 집계된 자료를 집계구로 집합한 자료이고, 해가 갈수록 증가하는 추세가 더욱 뚜렷해지는 것을 알 수 있다. 2014년에 노원구, 도봉구, 양천구에서 먼저 받아들이기 시작하여, 해당 지역을 중심으로 미니태양광을 설치하는 가정이 눈에 띄게 늘어나고 있다. 물론 2015년 송파구, 성북구, 2017년 은평구와 같이 계속해서 새로운 지역에서 미니태양광을 받아들이고 있다. 이는 서울시에서 가정용 미니태양광 보급 확산 정책을 시행한 지 오래되지 않아 곳곳에서 미니태양광을 설치하는 ‘개혁성’을 지닌 개인이 새롭게 등장하고 있기 때문이다.

그러한 한편으로 지역별로 증가하는 정도가 다르다는 것을 확인할 수 있다. 노원구와 도봉구는 다른 지역에 비해 상대적으로 일찍 미니태양광을 받아들였을 뿐만 아니라 해를 거듭할수록 설치밀도가 꾸준히 증가하고 있다. 은평구와 같이 2016년에 새롭게 설치하기 시작하여 상당히 빠르게 설치가 증가하는 지역도 있다. 은평구의 도시재생사업 정책에 의한 영향 때문으로 지자체의 의지는 미니태양광 확산에 강력한 동인이 된다. 반면, 서초구, 강남구를 비롯하여 중구, 용산구, 종로구 등 여전히 설치

밀도의 증가가 미진해 보인다.



[그림 4-4] 집계구별 미니태양광 설치 밀도

3. 연구 모형

본 연구는 서울시 아파트를 대상으로 가정용 미니태양광의 보급 확산에 영향을 미치는 요인이 무엇인지 살펴본다. 서울시 내 795개 아파트단지를 대상으로 하였으며 2014년부터 2017년까지 4년간의 데이터를 사용하는 강한 균형패널 자료를 구축하였다. 분석에 사용된 모형은 종속변수가 이산분포하는 가산자료이며 영(0)이 과다하게 관측되며 과도분산하므로 영과잉 음이항 회귀모형(zero-inflated negative binomial regression)을 사용하여 분석하는 것이 적절하다.

영과잉 회귀모형은 1992년에 Lambert에 의해 고안되었는데 가산자료의 영과잉 문제를 극복하기 위한 모형이다. 최우추정법을 사용하여 관측 집단이 영인지 양수인지 확률함수의 결합된 형태를 이용하여 추정하며, 관측 집단이 양수로 추정될 경우 포아송 분포 혹은 음이항 분포를 활용한다. 아래 식 (1)은 이를 정리한 것이다(Cameron·Trivedi, 2013).

$$\Pr[y=j] = \begin{cases} \pi + (1-\pi)f_2(0) & \text{if } j=0 \\ (1-\pi)f_2(j) & \text{if } j>0 \end{cases} \quad (1)$$

식 (2)는 이 모형의 로그우도함수이다.

$$\begin{aligned} L(\theta_1, \theta_2) = & \sum_{i=1}^n (1-d_i) \ln[\pi(x_i, \theta_1) + (1-\pi(x_i, \theta_1))f_2(0|x_i, \theta_2)] \\ & + \sum_{i=1}^n d_i \ln[(1-\pi(x_i, \theta_1))f_2(y_i|x_i, \theta_2)] \end{aligned} \quad (2)$$

본 연구에 사용한 자료는 강한 균형패널이다. 따라서, 선형 회귀모형에서 고려하지 못하는 오차항의 개체 및 시간 특성을 고정 효과(fixed effect) 혹은 임의 효과(random effect)로 처리한다면 관측하지 못하는 오차(correlated unobservables)를 줄일 수 있다(이희연·노승철, 2012). 이 연구는 서울시 내에서 미니태양광을 채택하고 확산하는 영향력을 발견하기 위해 아파트단지를 분석단위로 하여 연구를 진행한다. 그러므로

아파트단지의 개체특성을 고정효과로 고려할 때 이 연구에서 선정한 변수를 이용해 미처 설명하지 못했던 아파트단지의 영향력을 통제할 수 있다. 더불어 시간에 따라 변하는 미관측 오차를 줄이기 위해 연구의 관측 단위인 1년 단위로 시간 고정효과를 포함하였다. Bollinger·Gillingham (2012)는 미니태양광의 이웃효과를 확인하는 연구에서 임의효과 적용에 의문을 제기한다. 이웃효과를 확인하기 위해 전년도까지 설치된 미니태양광을 변수로 고려할 경우 기존 미니태양광의 설치를 결정할 때 이미 미관측된 임의효과가 발생하여 변수에 반영되어 있으므로 임의효과 간에 상관관계가 발생할 수 있다. 따라서 일치 추정량을 가질 수 없으므로 임의효과를 적용할 수 없다고 지적한다. 더불어 개체특성과 시간특성을 고정효과로 고려할 경우 선행연구에서 공간적으로 인접한 이웃효과를 식별하기 위해 고려해야 하는 동질성(homophily), 상관있는 미관측 오차(correlated unobservables), 그리고 동시성(simultaneity)를 극복할 수 있다(Graziano·Gillingham, 2015).

V. 결과 해석

1. 기초통계

[표 5-1]은 본 연구에서 사용한 모든 변수의 기초통계량을 보여준다. 연구의 표본은 2014년도부터 2017년도까지 각 년도 795개의 아파트단지 표본 크기는 총 3,180개의 아파트단지이다. 종속변수인 아파트단지의 미니태양광 신규 설치 세대수는 평균 2.37세대로 나타난다. [표 5-2]는 미니태양광의 연도별 신규 및 누적 설치 세대수를 보여준다. 신규로 설치된 평균 세대수가 2014년 0.74세대에서 2017년 5.79세대로 3년 만에 약 7.8배 증가했으며, 누적 세대수 역시 2017년 9.5세대로 12.8배 증가하였다. 아파트단지의 인구밀도는 세 그룹으로 나누어 변수를 구축하였다. 20-39세 평균 인구밀도는 $0.057\text{인}/m^2$, 40-69세 평균 인구밀도는 $0.084\text{인}/m^2$, 그리고 70세 이상 평균 인구밀도는 $0.017\text{인}/m^2$ 이다. 각 세대의 월 평균 전기사용량은 로그를 취한 값으로 2.563kWh이다. 이를 실수로 변환하면 평균 379.807kWh이며, 서울시 월별 가구당 전기소비량(2014년 305kWh, 2015년 304kWh, 2016년 309kWh)에 비해 높다(서울특별시, 2017b). 실거래 평당 단가는 표본인 아파트단지의 평균 평당 실거래가를 의미하며, 로그를 취한 값이 1.292백만원으로 실수로 환산하면 약 2,400만원이다. 건조환경 변수를 살펴보면, 표본으로 선정된 아파트의 평균 나이는 약 19.5년, 세대 평균 면적은 로그를 취한 값으로 $2.029m^2$ 이며, 세대수는 평균 882.58세대로 산출되었다. 사회변수로서 표본 중 에너지자립마을에 참여한 아파트단지의 수는 [표5-2]에서 확인할 수 있다.

이웃효과 변수에서는 아파트단지 내 설치밀도의 평균은 0.002이며, 아파트단지 반경 0-500m 내에서는 평균 20.86세대, 0-1,000m 내에서는 평균 49.55세대, 0-1,500m 내에서는 평균 85.62세대에서 미니태양광을 설치한 것으로 나타난다.

[표 5-1] 변수의 기초통계

변수		단위	표본 크기	평균	표준 편차	최소	최대
종속변수							
미니태양광 신규 설치 세대수		세대	3,180	2.374	12.641	0	348
독립변수							
인구	인구밀도(20-39세)	인/ m^2	3,180	0.057	0.04	0.0004	0.232
	인구밀도(40-69세)	인/ m^2	3,180	0.084	0.056	0.0001	0.284
	인구밀도(70세 이상)	인/ m^2	3,180	0.017	0.013	0	0.079
경제	보조금	만원	3,180	4.23	4.48	0	10
	월 평균 전기사용량	kWh(log)	3,180	2.563	0.128	2.095	3.373
	실거래 평당 단가	백만원(log)	3,180	1.292	0.159	0.971	1.938
건조 환경	건축물 나이	년	3,180	19.564	7.725	2	46
	세대 평균 면적	m^2 (log)	3,180	2.029	0.197	0.413	4.435
	아파트 세대수	세대	3,180	882.58	750.2	156	5,678
사회	ICLEI 가입	0 / 1	3,180	0.295	0.456	0	1
	정치성향	0 / 1	3,180	0.209	0.407	0	1
	에너지자립마을 참여	0 / 1	3,180	0.01	0.1	0	1
이웃 효과	단지 내 설치밀도	-	3,180	0.002	0.012	0	0.321
	설치 세대수 0-500m	세대	3,180	20.862	72.866	0	975
	설치 세대수 0-1,000m	세대	3,180	49.549	143.02	0	2,005
	설치 세대수 0-1,500m	세대	3,180	85.615	207.96	0	2,158

[표 5-2] 미니태양광 설치세대 및 에너지 자립마을 참여 단지 수

			빈도 (아파트단지 평균)			
			2014년	2015년	2016년	2017년
미니태양광	신규		591 (0.74)	790 (0.99)	1,565 (1.97)	4,603 (5.79)
설치 세대	누적		591 (0.74)	1,381 (1.74)	2,946 (3.71)	7,549 (9.50)
에너지자립마을 참여			4	6	8	18

2. 결과 분석

1) 전체 모형

[표 5-3]은 아파트 미니태양광 설치에 영향을 미치는 요인이 무엇인지 분석한 결과를 보여준다. 모형(1)은 상관관계 분석을 따라 다중공선성이 예상되는 변수(아파트단지 반경 0-1,500m 내 미니태양광 설치 세대수)를 제외한 모형이다. 변수를 포함했을 때와 제외했을 때 다른 설명변수들의 계수와 유의확률에는 큰 차이가 없었지만 이웃효과 변수 중 아파트단지 0-1,000m 내 미니태양광 설치 세대수 변수의 계수와 유의확률에서 차이가 발생했다. 따라서, 다중공선성이 발생하여 결과에 영향을 미치므로 모형(1)에 따라 해석을 진행한다.

인구 요인은 20세에서 39세, 40세에서 69세, 그리고 70세 이상 인구를 대상으로 살펴보았다. 상대적으로 어린 나이인 20세에서 39세 인구가 적을수록 미니태양광 채택률이 낮게 나타난다. Bollinger·Gillingham(2012)의 ZIP code를 대상으로 한 연구에서도 20세에서 45세 인구에서 가정용 태양광 채택률이 낮게 도출되어 이 연구와 비슷한 결과를 보인다. 선행 연구에 따르면 40대에서 가정용 태양광 채택률이 높게 나타난다(Zahran et al., 2008; Kwan, 2012; Jayaweera et al., 2018). 이 연구에서도 40세에서 69세 인구의 밀도가 높은 아파트단지에서 미니태양광을 더 많이 채택하고 있다. Hong et al(2017)에 따르면 서울 강남구를 기준으로 오후 12시에서 2시 사이가 루프탑 태양광 전력의 생산 피크타임이며 이 시간을 전후로 전력 생산량이 줄어든다. 아파트에 설치되는 미니태양광은 전력생산 및 소비가 즉시 일어나기 때문에 피크타임에 사용할 수 있는 가정이 비용 절감에 유리한 측면이 있다. 이 때문에 낮에 재실시간이 긴 연령대인 중년 여성 인구가 많은 아파트단지에서 미니태양광을 더 많이 설치할 가능성이 있다. 반면 70세 이상 인구밀도 변수는 통계적으로 유의하지 않았다.

경제 요인은 미니태양광 보조금, 세대 평균 전기소비량, 아파트 실거래 평균 단가가 유의하게 도출되었다. 보조금을 지원하는 자치구의 수는 2014년의 노원구를 시작으로 2015년 5개구, 2016년 14개구으로 증가하

[표 5-3] 가정용 미니태양광 채택에 영향을 미치는 요인 분석결과

요인	설명 변수	(1)		(1̂)	
		계수	표준오차	계수	표준오차
인구	20-39세 인구밀도	-3.666*	1.933	-3.418*	1.935
	40-69세 인구밀도	4.064**	1.944	3.883**	1.952
	70세이상 인구밀도	-2.419	6.288	-1.982	6.331
경제	보조금	0.186***	0.013	0.186***	0.013
	평균 전기소비량	-0.842*	0.439	-0.809*	0.439
	실거래 평당 단가	-2.96***	0.408	-3.027***	0.411
건조 환경	아파트 나이	-0.05***	0.0068	-0.049***	0.007
	세대 평균 면적	0.34	0.3	0.3007	0.2969
	세대수	0.081***	0.005	0.081***	0.0065
사회	ICLEI 가입	0.111	0.101	0.131	0.103
	정치성향	-0.600***	0.142	-0.599***	0.142
	에너지자립마을 참여	2.601***	0.382	2.58***	0.3826
이웃 효과	단지 내 설치밀도	0.239***	0.076	0.241***	0.0762
	설치세대수 0-500m	0.0017*	0.00087	0.0016**	0.001
	설치세대수 0-1,000m	-0.0007*	0.00038	-0.00005	0.0006
	설치 세대수 0-1,500m	-	-	-0.00056	0.00038
상수		4.561	1.104	4.561	1.104
관측치		3,180		3,180	
고정효과		YES		YES	
BIC		8452.4		8458.7	
AIC		8325.0		8325.3	

유의도: *p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01

여 2017년에는 25개구에서 지원하고 있다. 자치구에서 지급하는 보조금 덕분에 미니태양광 설치 금액의 최대 75%를 지원받고 설치할 수 있으므로 보조금이 보급 확대에 중요한 영향을 미치는 것은 당연한 결과라고 볼 수 있다. 세대 평균 전기소비량 및 아파트단지의 실거래 평당 단가가 낮을수록 미니태양광을 더 많이 설치한다. 과거와는 달리 최근 연구에서는 소득이 낮을수록 가정용 태양광을 더 많이 설치하는 경향이 있음이 나타난다(Bollinger·Gillingham, 2012; Müller·Rode, 2013). Parkins et al.(2018)이 캐나다에서 재생에너지 채택에 영향을 미치는 개인의 특성을 살펴본 연구에 따르면 에너지 문제에 적극적으로 참여하고 환경에 관심이 있는 사람일수록 재생가능에너지를 더 많이 채택하는 경향이 있다. 이러한 사람들은 가정의 에너지 소비를 줄이기 위해 다양한 노력을 기울이며 그 노력의 일환으로 가정용 미니태양광을 설치했을 가능성이 있다. 이성재(2018)의 연구에서도 아파트단지의 전력소비량이 낮을수록 미니태양광 설치율이 높게 나타났으며, 이를 2016년 기준 월평균 전력 소비량이 500kW 이하인 가구만 보조금을 지원하기 때문으로 분석한다. 이성재의 같은 연구에서 서울시의 공시지가가 낮은 아파트단지일수록 미니태양광을 설치하는 경향이 있음이 나타난다. 이를 에너지 비용을 부담할 능력이 충분한 소득수준이 높은 가구에서 미니태양광 설치에 관심을 가지지 않을 수 있기 때문이라고 주장한다. 본 연구에서도 실거래가가 낮을수록 미니태양광을 더 많이 설치하는 것으로 나타나 선행연구의 결과를 지지한다.

사회 요인에서는 지자체장이 진보정당에 소속된 자치구와 에너지 자립 마을에 참여한 아파트일수록 미니태양광을 설치하는 경향이 있다고 나타난다. 김민수(2017)의 ICLEI가 기초지자체의 에너지소비에 미치는 영향을 분석한 연구에서 지자체장이 민주당, 민주노동당 계열 정당일 경우 그 외 보수정당의 지자체장이 이끄는 지자체보다 에너지를 덜 쓴다는 결과가 도출되었다. 지자체장이 에너지 절약에 관심이 있을 경우 지자체 차원에서 에너지 소비를 줄일 수 있는 다양한 정책적인 방법을 모색한다. 이러한 이유로 미니태양광 설치에 적극적일 수 있다. 한편 에너지자

립마을에 참여한 아파트가 많을수록 미니태양광 설치가 증가한다는 결과가 도출되었다. 도출된 회귀계수에 따르면 에너지자립마을에 참여한 아파트가 그렇지 않은 아파트에 비해 약 13.5배($e^{2.601} = 13.48$) 미니태양광을 더 설치한다. 에너지자립마을의 효과는 직·간접적으로 영향을 미쳤을 수 있다. 직접적으로는 지원금을 사용하여 미니태양광을 직접 설치하는 경우를 말하며, 간접적으로는 아파트단지 차원에서 실행하는 에너지 절약 운동과 같은 사업이 주민들의 에너지 의식을 높여 미니태양광 설치를 유인했을 수 있다. 에너지자립마을에 참여한 아파트의 활동내역에 따르면, 종로구에 있는 창신 쌍용 마을은 에너지 자립마을 활동의 일환으로 세대 내 미니태양광을 설치했으며, 성내동 코오롱 마을과 구로구 한마을 아파트에서는 각각 세대 내 LED 설치 및 에너지진단, 미니태양광 설치 효과 홍보 등의 활동을 했다고 보고한다. 이와 같은 마을 차원의 직접적 혹은 간접적인 활동이 해당 아파트단지의 미니태양광 증가에 영향을 미쳐 결과에 반영되었다고 볼 수 있다.

아파트단지의 건조환경 변수에서는 아파트단지의 연령과 세대수가 유의하게 도출되었다. 신축 아파트일수록 미니태양광을 설치하는 데 적극적으로 드러난다. 미니태양광의 수명은 일반적으로 15-20년으로 알려져 있으며, 한 번 설치 후 오래 이용할수록 경제적으로 더 이득이 있다. 따라서 재건축을 앞두고 있거나 오래된 아파트단지에 거주하는 사람들은 설치에 관심이 덜 할 수 있다. 더불어 미니태양광을 이전 설치하는 것이 가능하지만 약 10만원의 정도의 금액이 발생하므로 세입자들은 설치를 꺼릴 수 있다.⁷⁾

아파트단지의 세대수가 많을수록 미니태양광 설치가 증가하는 경향이 있다. 이는 자연스러운 현상으로 아파트단지의 세대수가 많을수록 미니태양광을 설치하는 ‘개척적’ 성향을 가진 사람이 많을 확률이 높기 때문이다. 그러나 한편으로 한 아파트단지에 미니태양광 설치가 많을수록 단지의 주민들에게 시각적으로 노출될 확률이 크므로 시각적으로 영향을 미치는 이웃효과가 발생할 가능성도 있다.

7) 서울특별시 블로그(<http://blog.seoul.go.kr>).

이 연구는 아파트 미니태양광 설치에 있어 사회적 상호작용의 영향력이 존재하는가가 중요한 연구 가설 중 하나였다. 사회적 상호작용의 효과를 분석하기 위해 아파트단지의 설치세대 밀도와 아파트 반경 500m, 1,000m, 1,500m 범위로 전년도까지의 미니태양광 설치 누적 세대수를 변수로 구축하였다. 분석결과 아파트단지 내부에 미니태양광을 설치한 세대의 밀도가 증가할수록 신규로 설치하는 세대가 늘어난다. 아파트단지 내부의 미니태양광 설치밀도가 높을수록 사람들에게 시각적으로 더 많이 노출될 확률이 있다. Janssen·Jager(2002)는 녹색 제품의 확산에 관한 연구에서 혁신의 관측 가능성(observability)이 채택에 긍정적인 영향을 미치는데, 이미 기술을 받아들인 사람들의 비율이 높을수록 새로운 기술을 받아들이는 경향이 있다고 말한다. 더불어 사회적 욕구와 결부하여 소비자가 자신의 이웃과 동일한 것을 소비할 때 만족감을 느끼며, 이따금씩 사회적 비교와 모방에 참여한다고 주장한다. 미니태양광의 밀집도가 높아질수록 사회적으로 승인되거나 공통적으로 적용되는 규범이라고 여겨 미니태양광을 설치했을 수 있다. Frederiks et al.(2015)는 이를 규범적 사회적 영향(normative social influence)으로 설명한 바 있다.

아파트단지 내부의 미니태양광 설치밀도와 더불어 아파트단지 반경 500m 내에서도 미니태양광을 설치한 세대가 많을수록 신규로 설치하는 가정이 늘어난다. 아파트단지 간 미니태양광 설치를 유발하는 효과에는 이웃 간 입소문에 의한 효과보다는 베란다에 설치되어 있는 미니태양광을 목격할 때 발생하는 시각적인 효과가 더 크다고 여겨진다. 연구의 결과에 따라 기존에 설치된 미니태양광의 시각적인 효과가 아파트단지 반경 약 500m까지 유효하게 나타난다고 생각할 수 있다. 선행연구에서도 지역에 따라 가정용 태양광 채택에 영향을 미치는 거리가 다양하게 도출되었다. Graziano·Gillingham(2014)의 미국 코네티컷을 대상으로 한 연구에서는 804m(0.5mile), Rode·Weber(2016)의 독일 전역을 분석한 연구에서는 1km, 미국 텍사스 지역을 분석한 Rai·Robinson(2015)의 연구에서는 610m가 도출되었다. 이 연구에서는 아파트단지 반경 500m가 가정용 미니태양광 채택에 영향을 미치는 범위로 도출되었는데, 선행연구

에 비해 영향력의 거리가 짧게 도출되었다. 한편 아파트단지 반경 0-1,000m에서는 부(-)의 영향력이 발생하는 것으로 나타난다. 이를 아파트단지 반경 500m에서 1,000m까지의 거리에서 미니태양광을 설치한 세대수가 통계적으로 유의하게 감소하는 것으로 해석 가능하다. 이로써 거리의 영향력에 따른 결과를 종합하면, 서울시 아파트단지에 설치되는 미니태양광이 약 반경 500m에서 군집되어 있음을 알 수 있다. 이는 기존에 설치된 미니태양광에 인접할수록 미니태양광을 설치하도록 유발하는 효과가 발생하며, 서울시는 아파트단지 반경 500m에서 군집이 형성된다고 말할 수 있다.

2) 에너지자립마을 모형

전체 모형의 결과에서 볼 수 있듯이 에너지자립마을에 참여하는 아파트단지의 미니태양광 신규 설치 세대수가 그렇지 않은 아파트단지에 비해 약 13.5배 높다. 에너지자립마을에 참여함으로써 나타나는 효과는 지원금을 사용해 미니태양광을 직접 설치하거나 에너지 절약 운동 등을 통하여 에너지 관련 의식을 고취시킴으로써 미니태양광 설치에 긍정적인 역할을 하는 것으로 요약할 수 있다. 이에 에너지자립마을에 참여한 아파트에서 나타나는 결과를 조금 더 자세히 살펴보고자 에너지자립마을에 참여한 아파트단지가 있는 자치구와 그렇지 않은 자치구를 분류하여 결과를 비교해보았다. [표5-4]의 모형(3)은 2014년부터 2017년까지 에너지자립마을에 한 번이라도 참여한 적이 있는 아파트단지가 속해있는 10개 자치구를 대상으로 하였고, 모형(4)은 에너지자립마을에 참여하지 않거나 혹은 소수인 경우에 속한 10개 자치구를 대상으로 한 분석결과이다.⁸⁾

분석결과 이웃효과의 영향력이 상이하게 도출되었다. (1)번 모형의 경우 전체 모형의 결과와 동일한 결과를 보인다. 아파트단지 내부의 미니태양광 설치밀도, 아파트단지 반경 500m에서 설치 세대수가 증가할수록 신규 설치에 긍정적인 영향을 미친다. 아파트단지 내부의 설치밀도에 따른 영향력을 살펴보면 밀도가 1% 증가하면 신규 설치가 약 28%⁹⁾ 증가한다. 아파트단지 주변 미니태양광 누적 설치 세대수도 긍정적인 영향을 미치는 것으로 나타난다. 아파트단지 반경 500m에서 미니태양광을 설치한 세대가 1세대 증가할 때마다 는 약 0.17% 증가하는 것으로 도출되었다. 반면, 에너지자립마을이 포함된 아파트가 없는 모형(3)에서는 아파트단지 내부 미니태양광 설치밀도는 정(+)의 영향력이 나타났으나 아파트단지 반경 0-1,000m까지의 누적 설치 세대수에서는 부(-)의 영향이 통계적으로 유의하게 도출되었다. 에너지자립마을에 참여한 아파트단지가

8) (2)번 모형에 선정된 자치구는 노원구, 서대문구, 구로구, 강동구, 종로구, 동대문구, 동작구, 송파구, 강남구, 성동구이다. 에너지자립마을에 속한 아파트단지가 많은 상위 10개 자치구를 선정하였다. (3)번 모형에 선정된 자치구는 중구, 중랑구, 성북구, 금천구, 관악구, 은평구, 강북구, 광진구, 마포구, 용산구이며, 에너지자립마을에 참여한 아파트단지가 하나도 없거나 혹은 1개 아파트단지인 자치구이다.

9) 퍼센트 변화(%) = $(RR-1) \times 100$, $RR = \exp(\text{회귀계수})$

거의 없는 지역에서는 미니태양광의 확산이 아파트단지 내부에서만 활발히 일어난다고 해석할 수 있으며, 아파트단지 반경 500m 범위를 넘어서면 미니태양광 설치 세대수가 통계적으로 유의하게 줄어든다고 해석할 수 있다. 추가적으로 모형(3)에서 ICLEI 가입 여부가 유의한 변수로 새롭게 등장하였다. ICLEI에 가입한 지자체가 미가입한 지자체에 비해 미니태양광을 더 많이 설치하고 있는데, 이는 에너지자립마을의 영향력이 미미한 지역에서는 ICLEI 가입 여부가 미니태양광 설치에 영향을 미치고 있다고 해석할 수 있다.

이로써 에너지자립마을을 중심으로 지역을 구분하여 분석한 결과에 따르면 에너지자립마을에 참여한 아파트가 다수 존재하는 지역에서는 미니태양광이 설치된 세대가 아파트단지 반경 약 500m에서 군집을 이루는데 비해 에너지자립마을에 참여한 아파트가 없거나 소수인 지역에서는 미니태양광이 지역적으로 군집을 이루고 있다고 말할 수 없다. 따라서, (2)번과 (3)번 모형의 결과를 종합하면 아파트단지의 에너지자립마을 참여 여부가 미니태양광 확산에 보다 긍정적인 역할을 하고 있다고 해석할 수 있다.

[표 5-4] 에너지자립마을에 참여한 아파트의 영향력 분석결과

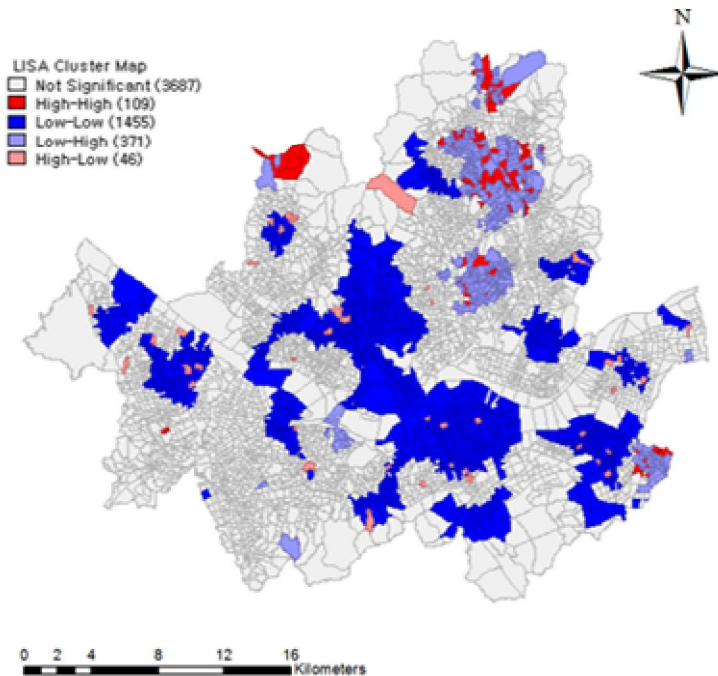
요인	설명 변수	(2)	($\hat{2}$)	(3)	($\hat{3}$)
인구	20-39세 인구밀도	1.308 (2.487)	1.96 (2.435)	-16.49*** (5.858)	-16.27*** (5.845)
	40-69세 인구밀도	-3.067 (2.282)	-3.441 (2.265)	28.03*** (5.337)	27.35*** (5.375)
	70세이상 인구밀도	-4.616 (6.666)	-4.524 (6.704)	-45.19*** (17.11)	-43.02** (17.21)
경제	보조금	0.191*** (0.022)	0.183*** (0.022)	0.184*** (0.036)	0.18*** (0.036)
	평균 전기소비량	-1.265** (0.644)	-1.161* (0.644)	-1.106 (0.813)	-1.102 (0.815)
	실거래 평당 단가	-2.079*** (0.695)	-2.477*** (0.705)	-0.677 (1.046)	-0.895 (1.07)
건조 환경	건축년도	-0.044*** (0.0102)	-0.047*** (0.01)	-0.0124 (0.016)	-0.013 (0.016)
	평균 세대 면적	0.6884 (0.566)	0.534 (0.569)	-0.508 (0.542)	-0.54 (0.545)
	세대수	0.062*** (0.008)	0.062*** (0.008)	0.118*** (0.01)	0.118*** (0.01)
사회	ICLEI 가입	0.202 (0.153)	0.239 (0.155)	0.526** (0.246)	0.523** (0.246)
	정치성향	-0.933*** (0.232)	-0.876*** (0.233)	-0.334 (0.345)	-0.344 (0.346)
	에너지자립마을 참여	2.647*** (0.444)	2.54*** (0.444)	- -	- -
이웃 효과	아파트 내부 전년도 누적 설치개수	0.252** (0.103)	0.247** (0.103)	0.483** (0.194)	0.484** (0.194)
	아파트 반경 0-500m 전년도 누적 설치개수	0.0017* (0.0008)	0.002** (0.001)	0.0007 (0.006)	0.0007 (0.006)
	아파트 반경 0-1,000m 전년도 누적 설치개수	-0.00038 (0.0004)	0.001** (0.001)	-0.0078*** (0.0028)	-0.0063** (0.0031)
	아파트 반경 0-1,500m 전년도 누적 설치개수	- -	-0.002*** (0.0005)	- -	-0.0015 (0.0014)
	상수	4.29*** (1.564)	4.847*** (1.574)	2.666 (2.178)	3.005 (2.208)
	관측치	1592	1592	804	804
조정효과		YES	YES	YES	YES
BIC		4437.7	4435.9	2171.7	2177.4
AIC		4324.8	4317.7	2078.4	2079.4

유의도: *p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01

NOTE: (2) 및 ($\hat{2}$) 모형은 에너지자립마을에 참여한 아파트단지가 있는 상위 10개 자치구, (3) 및 ($\hat{3}$) 모형은 에너지자립마을에 참여한 아파트단지가 없거나 혹은 소수인 10개 자치구가 대상인 모형이다. 단, ($\hat{2}$) 및 ($\hat{3}$) 모형은 아파트단지 반경 0-1,500m에서의 전년도 미니태양광 누적 설치세대수 변수를 포함한 모형이다.

3) 공간적 자기상관 모형

[그림 4-5]는 서울시 내 지역 간 설치밀도의 차이를 바탕으로 미니태양광의 국지적 공간분포 양상을 확인하기 위해 Local Moran's I를 활용한 결과이다. 2017년까지의 집계구별 누적 설치 밀도를 이용하였다. 이 연구에서는 공간 거리를 기반으로 만들어지는 공간가중치행렬을 이용했으며, 실제 거리의 역수를 이용하였다. Local Moran's I 값이 0.0186($p < 0.001$)으로 유의하게 나왔다. 양(+)의 값이 나왔으므로 공간적 자기상관이 존재한다고 볼 수 있다. 공간적 자기상관의 정도는 네 가지 유형(High-High, High-Low, Low-High, Low-Low)으로 구분된다. High-High는 해당 지역의 설치빈도가 높고 주변 지역에서도 설치가 많은 지역(핫스팟), High-Low는 해당 지역에는 높지만 주변 지역에는 설치가 적은 지역, Low-High는 해당 지역에는 설치가 적지만 주변 지역에는 설치가 많은 지역이고, 마지막으로 Low-Low는 해당 지역과 주변 모두 설치가 적은 지역(콜드 스팟)을 의미한다.



[그림 4-5] 미니태양광 설치밀도의 공간적 자기상관성

눈에 띄는 핫스팟은 총 다섯 지역으로 확인된다. 노원구, 도봉구, 동대문구, 은평구, 송파구로 핫스팟 지역이 어느 정도의 군집을 이루고 있음을 알 수 있다. 콜드스팟은 서초구, 강남구, 중구, 종로구, 용산구, 강서구로 대표할 수 있다. 이와 같이 서울시의 미니태양광 설치밀도가 지역별로 다르게 나타날 뿐만 아니라 공간적 자기상관이 있음을 확인하였다. 이에 이에 핫스팟과 콜드스팟이 두드러지는 지역을 구분하여 미니태양광 설치에 미치는 영향력의 정도를 비교할 수 있다.

[그림 5-4]의 모형(4)는 노원구, 도봉구, 동대문구, 은평구, 송파구를 대상으로 분석한 결과이다. 아파트단지 평균 전기소비량, 정치성향이 유의하게 도출된 것을 제외하고는 전체 모형과 거의 유사하다. 에너지자립마을에 참여한 아파트단지는 그렇지 않은 아파트단지에 비해 미니태양광 신규 설치 세대수가 약 9.6배 증가하며, 이웃효과에서도 아파트단지 내부 설치밀도가 1% 증가하면 약 23%, 아파트단지 반경 500m까지 세대수가 1세대 증가하면 약 0.12% 늘어난다.

한편 예상한 바와 같이 콜드스팟으로 군집된 지역을 대상으로 한 모형(5)에서는 이웃효과 변수의 영향력이 모두 유의하지 않게 도출되었다. 심지어 아파트단지 내 설치밀도의 영향력도 유의하지 않았다. 앞서 미니태양광 설치에 영향을 미치는 요인으로 사회적 욕구에 의해 이웃과 비슷한 종류의 소비를 하면서 느끼는 만족감이 미니태양광 채택의 동인임을 언급했다. 더불어 사회적으로 공통적으로 이해하는 가치에 동조하는 규범적 사회적 영향 역시 미니태양광이 밀집한 지역에 있는 사람들로 하여금 미니태양광을 설치하도록 유인하는 요소가 될 수 있음이 드러났다. 그러나 모형(5)에서는 적어도 미니태양광 설치에 있어 이 해석이 지지될 수 없다.

이 모형에서는 보조금, 실거래 평당 단가, 아파트단지의 세대수, 에너지자립마을 참여 여부의 네 가지 변수가 유의하게 도출되었다. 보조금은 만원 증가할수록 약 19.6% 증가하는 효과를 가진다. 모형(4)에서는 약 24.36% 증가했으므로 그에 비해 약 5% 정도 낮은 수치이다. 실거래 평당 단가에서는 모형(5)는 백만원이 감소하면 약 0.12%만큼 미니태양광

설치가 증가하지만 모형(4)는 0.54%만큼 증가하여 약 4.5배만큼 차이가 난다. 반면 에너지자립마을의 영향력은 모형(4)와 모형(5)에서 모두 참여하지 않은 아파트단지에 비해 약 9.6배로 비슷하게 나타난다.

[표 5-5] Local Morans'I를 통해 도출한 핫스팟과 콜드스팟 지역 분석결과

요인	설명 변수	(4)	($\hat{4}$)	(5)	($\hat{5}$)
인구	20-39세 인구밀도	-0.6407 (3.139)	-0.773 (3.184)	-9.505 (7.681)	-10.41 (7.725)
	40-69세 인구밀도	-1.276 (2.457)	-1.186 (2.483)	7.732 (8.981)	7.618 (8.902)
	70세이상 인구밀도	11.22 (7.714)	11.01 (7.763)	-27.27 (31.31)	-29.43 (31.28)
경제	보조금	0.218*** (0.023)	0.218*** (0.023)	0.178*** (0.058)	0.179*** (0.057)
	월 평균 전기소비량	-0.894 (0.622)	-0.903 (0.623)	-1.286 (1.501)	-1.326 (1.497)
	실거래 평당 단가	-5.216*** (1.038)	-5.222*** (1.037)	-6.743*** (1.708)	-6.742*** (1.683)
건조 환경	건축년도	-0.066*** (0.012)	-0.066*** (0.012)	-0.0299 (0.021)	-0.033 (0.021)
	평균 세대 면적	0.445 (0.314)	0.451 (0.316)	0.169 (1.034)	0.201 (1.038)
	세대수	0.07*** (0.008)	0.07*** (0.008)	0.058** (0.028)	0.058 (0.028)
사회	ICLEI 가입	0.05986 (0.1876)	0.057 (0.188)	0.543 (0.777)	0.59 (0.773)
	정치성향	-0.03231 (0.3126)	-0.027 (0.313)	-0.099 (0.616)	-0.09 (0.612)
	에너지자립마을 참여	2.262*** (0.5396)	2.268*** (0.54)	2.263* (1.286)	2.106* (1.264)
이웃 효과	아파트 내부 전년도까지 누적 설치개수	0.207** (0.082)	0.207** (0.082)	-6.007 (45.79)	-0.0014 (0.502)
	아파트 반경 0-500m 전년도까지 누적 설치개수	0.0012* (0.00075)	0.0012* (0.00075)	-0.004 (0.0077)	-0.0047 (0.0076)
	아파트 반경 0-1,000m 전년도까지 누적 설치개수	0.000014 (0.00037)	-0.0001 (0.0005)	0.0023 (0.006)	0.0071 (0.0069)
	아파트 반경 0-1,500m 전년도까지 누적 설치개수	- -	0.0001 (0.0004)	- -	-0.0048 (0.0036)
	상수	7.075*** (1.886)	7.103*** (1.887)	11.02** (4.521)	11.16** (4.484)
	관측치 고정효과	936 YES	936 YES	476 YES	476 YES
BIC		3151.3	3158.1	680.3	684.9
AIC		3049.6	3051.6	592.9	593.3

유의도: *p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01

NOTE: (4) 및 ($\hat{4}$) 모형은 Local Morans'I를 통해 도출된 핫스팟 지역으로 노원구, 도봉구, 동대문구, 은평구, 송파구 5개 자치구가 대상이다. (5) 및 ($\hat{5}$) 모형은 Local Morans'I를 통해 도출된 콜드스팟 지역으로 강남구, 서초구, 용산구, 중구, 종로구 5개 자치구가 대상이다.

3. 토의

서울시는 2017년에 ‘태양의 도시, 서울 2020’ 정책을 선포하면서 2022년까지 ‘태양광 설비용량 1GW(1,000MW)’와 ‘태양광 설치가구 1백만 가구’ 달성을 목표로 하였다. 특히 아파트에 설치되는 베란다형 미니태양광 설치에 주력하여 2022년까지 총 605,185가구에 보급할 계획이다. 이 정책은 아파트단지가 밀집해 있는 서울시의 공간적인 특성을 잘 반영한 정책으로 평가할 만하다. 그러나 현재 아파트 미니태양광을 설치하는 데 지원하는 보조금은 전체 설치비의 70% 이상으로 과도한 측면이 있다. 서울시가 목표한 대로 태양광을 보급하기 위해 현재 수준의 보조금을 계속 지원한다면, 서울시의 재정부담이 가중되리라는 것은 자명하다. 이에 보조금을 줄이기 위한 연구와 정책적 제안이 뒤따르고 있지만(염성찬·이응균, 2015; 이재석, 2018b), 동시에 보조금 축소가 미니태양광 확산에 걸림돌이 될 것이라는 우려도 무시할 수 없다(이재석, 2018a).

이 연구는 서울시의 미니태양광 확산에 미치는 영향을 인구, 사회, 경제, 건조환경 및 이웃효과 요인을 통해 확인하였다. 특히 혁신확산이론에 근거하여 이웃 간의 입소문과 인접한 위치에 설치된 미니태양광의 시각적인 효과가 아파트단지의 미니태양광 확산에 주는 영향에 초점을 맞추었다. 분석결과 아파트단지 내 미니태양광 설치밀도가 증가할수록 신규 미니태양광 설치 세대가 늘어났다. 거주하는 아파트단지와 인접한 아파트단지에 설치된 미니태양광의 설치 세대수의 증가 역시 신규 미니태양광 설치에 영향을 미치는 변수로 도출되었다. 이 결과는 미니태양광 설치 확산을 위한 새로운 관점을 제시한다.

먼저 이웃효과가 주는 영향력을 고려하여, 주변에 설치된 미니태양광을 보고 생긴 관심이 구매로 이어지도록 다양한 방법을 통해 정보를 제공해야 한다. 실제 이웃으로부터 정보를 얻거나 온라인을 활용할 수 있도록 하는 방법이 있다. Vaelente(1996)에 따르면 이웃 간 우정, 조언 및 지원이 확산에 중요한 요소이므로, 사람들로 하여금 실제 이웃이 전

하는 정보에 귀를 기울이게 할 수 있다. 따라서, 오프라인 중개인을 두어 미니태양광 확산의 매개체로 활용할 수 있다. 이 연구의 결과에 따라 아파트단지에 설치된 미니태양광이 아파트단지를 중심으로 반경 500m의 범위로 모여 있으므로 이를 활용하여 미니태양광 오프라인 중개인의 활동 범위를 선정할 수 있다. 온라인을 이용한 방법으로는, 주변에 설치된 미니태양광을 보고 관심이 생기더라도 관련 정보가 없어 설치하지 못하는 세대가 있을 수 있다. 이를 위해 온라인을 통해 미니태양광이 주는 편익과 상세한 정보가 담긴 웹 페이지를 마련해야 한다. 또한, 미니태양광을 설치한 사람들의 사용 후기를 공개하여 미니태양광에 호감이 있는 사람들을 설득할 수 있다. 최근 다양한 기업에서 일반 구매자를 서포터즈로 선정하여 마케팅에 활용하고 있다. 서포터즈로 선정된 이들은 해당 제품에 대한 상세한 구매 후기를 개인의 SNS, Blog 등에 올려 제품을 홍보한다. 일반인이 올리는 홍보이므로 사람들에게 거부감이 적고, 보다 높은 신뢰를 줄 수 있다. 추가적으로 시각적인 효과와 관련하여, 가용 공공부지에 태양광 설비를 설치함으로써 사람들이 관심을 갖도록 유도하는 것도 생각해 볼 수 있다.

이웃효과와 함께 에너지자립마을이 중요한 변수로 도출되었다. 특히 에너지자립마을에 참여한 아파트단지가 많은 자치구에서 이웃효과가 더 강하게 나타난다. 에너지자립마을에 참여한 아파트단지는 에너지 절약을 위한 다양한 활동을 하는데, 지원금을 사용하여 직접 미니태양광을 설치하기도 하고, 개별 세대 에너지 컨설팅, 에너지 교육을 비롯하여 LED등 설치, 단열 및 창호 개선 등 에너지 절약을 위해 다방면으로 노력한다. 이러한 활동을 통해 에너지 시민 의식을 형성하여 가정용 재생가능에너지에 관심이 생겼을 수 있다. 가정에 미니태양광을 설치하는 것이 개인 수준에서 기후변화 완화에 도움이 되고, 가정의 에너지 비용을 절약할 수 있는 좋은 수단이 될 수 있기 때문이다. 이러한 이유로 에너지자립마을에 참여한 아파트단지에서 에너지 관련 정보의 확산이 더 활발하게 일어날 수 있다. 따라서 에너지자립마을을 늘림으로써 미니태양광 확산에 긍정적인 효과를 미칠 수 있다. 한 가지 더 제안하자면 에너지자립마을

선정 시 이 연구에서 도출된 영향력의 범위가 중복되지 않도록 아파트단지를 선정한다면 보다 큰 효과를 얻을 수 있을 것이다.

이 연구에서 40세에서 69세 인구의 밀도가 높을수록 미니태양광을 더 많이 설치하는 것도 눈여겨볼 만하다. 앞서 살펴봤듯이 채실 시간과 깊은 관련이 있는 것으로 보인다. 해당 연령대에서 미니태양광에 관심이 많다고 판단할 수 있으므로, 연령대에 맞는 홍보 방안이 무엇인지 고민할 필요가 있다. 신축 아파트일수록 미니태양광 설치에 적극적으로 나타난다. 미니태양광을 설치한 후 이전하게 되면 그에 따른 비용이 발생하므로, 이것이 미니태양광 설치에 큰 걸림돌이 될 수 있다. 따라서, 2년에 한 번씩 이사를 고려하는 세입자들이 미니태양광을 설치할 수 있도록 이전 비용에 대한 대책을 마련할 필요가 있다.

VI. 결론

1. 요약 및 시사점

본 연구는 서울시의 아파트단지를 대상으로 가정용 미니태양광을 채택하는 데 영향을 미치는 요인이 무엇인지 분석하였다. 특히 혁신확산이론에 근거하여 미니태양광 보급이 활발한 아파트단지를 중심으로 이웃효과에 의한 확산이 일어날 것이라고 보았다. 이웃효과는 미니태양광을 먼저 설치한 ‘개척성’을 가진 개인이 퍼뜨리는 입소문과 인접한 위치에 설치된 미니태양광의 시각적인 효과를 통해 일어난다. 이를 정량적으로 확인하기 위해 이웃효과 요인을 네 가지 변수로 구성하였다. 구성된 변수는 아파트단지 내부의 전년도까지 미니태양광을 설치한 세대의 밀도, 아파트단지 반경 500m, 1,000m, 1,500m 내에서의 전년도까지 미니태양광을 설치한 세대수이다. 종속변수는 가산자료로 2014년부터 2017년까지 각 연도의 아파트별 미니태양광 신규 설치 세대수이고, 사회적 상호작용의 설명변수로써 연령별 인구밀도, 보조금, 전기사용량, 건축물 나이, 에너지자립마을 참여 여부 등을 선정하였다. 자료는 4년간의 균형 패널자료를 구축하여 분석에 사용하였다.

분석결과 서울시 아파트단지에 신규 설치되는 미니태양광이 아파트단지의 미니태양광 설치밀도가 높을수록 증가하며, 더불어 아파트단지 반경 500m 내에서 미니태양광 설치세대가 늘어날수록 신규 설치분이 증가한다는 사실이 통계적으로 유의하게 나타났다. 이웃의 행동을 모방함으로써 만족을 얻는 사회적인 욕구가 아파트단지의 미니태양광 밀도가 높거나 자신의 아파트가 아니더라도 인접한 아파트단지에 설치된 미니태양광을 많이 목격할수록 미니태양광을 설치하는 동인이 된다고 볼 수 있다. 아파트 반경 1,000m에서는 부(-)의 영향을 미치는 것으로 나타나는 데, 이는 아파트단지 500m에서 1,000m 사이에서 미니태양광 설치 세대수가 통계적으로 유의하게 줄어든다는 의미로 해석할 수 있으며, 서울시 아파트단지를 대상으로 한 미니태양광의 분포가 아파트단지 반경 약

500m에서 군집하고 있다고 말할 수 있다.

아파트단지의 에너지자립마을 참여 여부는 미니태양광 설치에 영향을 미치는 또 다른 중요한 변수로 도출되었다. 에너지자립마을에 참여하는 아파트단지는 에너지 교육과 에너지 절약을 위한 다양한 실천적인 프로그램을 진행한다. 이러한 프로그램에 참여한 주민들의 에너지 시민 의식이 높아져 미니태양광 설치에 긍정적으로 작용했을 가능성이 높다. 에너지자립마을에 참여한 아파트단지가 다수 존재하는 자치구에서 아파트단지 내 설치밀도가 높을수록, 그리고 아파트단지 반경 500m에서 설치 세대수가 많을수록 신규 설치가 증가했다. 그러나 아파트단지 반경 1,000m에서는 통계적으로 유의하지 않게 도출되어 전체 모형과는 다른 결과를 보였다. 이는 에너지자립마을에 참여한 아파트단지가 많은 자치구에서는 500m에서 1,000m 사이에서도 미니태양광을 설치한 세대가 증가하는 지역이 존재할 수 있다고 추정할 수 있다. 에너지자립마을 활동이 활발한 아파트단지의 미니태양광 확산에 영향을 미치는 공간적인 범위가 그렇지 못한 아파트단지에 비해 넓을 가능성이 있다. 이러한 이유로 아파트단지 반경 1,000m까지의 미니태양광 세대수 변수가 통계적으로 유의하지 않게 도출되었을 것이다.

서울시는 현재 에너지 수요관리의 일환으로 아파트에 설치되는 미니태양광을 보급하고자 힘쓰고 있다. 서울시와 자치구의 보조금을 더하면 전체금액의 약 70%가량을 지원받고 미니태양광을 설치하고 있어 그 증가 추세가 빠르게 증가하고 있다. 그러나 현재의 보조금은 과도한 측면이 있어 서울시의 목표대로 2022년까지 총 605,185가구에 미니태양광을 설치하기 위해서는 재정적인 부담이 매우 커진다. 이러한 관점에서 이 연구는 보조금에 의존하는 미니태양광 확산 정책을 개선하기 위한 시사점을 가진다. 현재 드러난 사회적 상호작용의 영향력은 미니태양광을 설치하는 개인의 능동적인 행동에 의존하는 경향이 있다. 그러므로 주변에 미니태양광을 설치한 ‘개혁성’을 가진 개인이 존재하지 않는 경우, 지역 공동체가 에너지 수요관리에 관심이 없어 에너지자립마을과 같은 활동에 참여하지 않을 경우, 혹은 인접한 위치에 미니태양광을 설치한 세대가

있지만 입소문이 전달될 만한 공동체가 없는 경우에는 미니태양광을 설치할 가능성이 줄어들 수밖에 없다. 그러므로 사람들이 사회적 상호작용의 영향에 좀 더 노출되어 미니태양광의 장점을 인지하고 설치하는 데까지 이르게 하기 위해 다양한 홍보 전략을 사용한다면 미니태양광 신규 설치분 증가에 도움을 줄 수 있다. 미니태양광 서포터즈를 선발하여 실제 미니태양광 사용에 따른 후기를 온라인을 통해 제공하거나, 오프라인에서도 미니태양광 관련 정보를 제공하고 궁금증에 답변할 수 있는 중개인을 두는 방안이 있을 수 있겠다. 또한, 이 연구에서 도출한 서울시의 미니태양광 군집의 공간적인 범위를 토대로 중개인의 관할 구역을 분담할 수 있다. 에너지자립마을을 통한 미니태양광 홍보도 효과가 있을 수 있다. 에너지자립마을에 선정된 아파트단지에 미니태양광을 적극적으로 홍보함으로써 에너지자립마을에 지원되는 지원금을 미니태양광을 설치하는 데 직접적으로 사용하지 않고도 신규 미니태양광 설치 세대가 증가하는 효과를 누릴 수 있을 것이다.

에너지 수요관리를 위해 개인 차원에서 실천할 수 있는 행동으로 아파트단지에 설치되는 미니태양광은 좋은 수단이 될 수 있다. 실제로 가정에서 사용하는 전력을 생산할 뿐만 아니라 시민들의 에너지 의식을 높이는 동기가 될 수 있기 때문이다. 더욱이 미니태양광 설치 보조금을 축소함으로써 예상되는 신규 설치 감소분을 만회하기 위해 다양한 종류의 노력이 필요한 상황에서 사회적 상호작용의 영향력을 이용할만한 이유가 충분하다. 시민들이 자발적으로 에너지 절약 및 생산에 참여하고 능동적으로 행동하도록 유도할 수 있는 다양한 방법을 개발하는 것이 필요하다. 이는 지자체의 에너지 전환 시도를 확대하는 새로운 기회가 될 것이다.

2. 연구의 한계 및 향후 연구 방향

본 연구는 미니태양광 설치에 영향을 미치는 요인을 파악하기 위해 아파트단지가 가지는 평균적인 특성을 사용하였다. 되도록 변수 선정에 있어 아파트단지가 가지는 공통적인 변수를 선정하려고 노력했으나 인구 및 경제 요인을 대리하는 설명변수(연령별 인구밀도 및 전기사용량)는 자료의 한계로 아파트단지의 평균값을 사용하였다. 이를 위해 같은 아파트단지에 거주하는 가구가 동일한 특성을 가지고 있을 것이라고 전제하였다. 그러나 실제로는 다양한 차이가 존재할 수 있다.

이 연구는 서울시 미니태양광이 확산하는 공간적인 분포 특성을 확인하는데 초점을 맞춘다. 이웃 간에 전파되는 입소문과 인접한 위치에 설치된 미니태양광을 설치함으로써 발생하는 시각적인 효과에 주목하여 공간적으로 이러한 특성이 나타나고 있음을 확인하였다. 그러나 미니태양광을 설치하는 데 있어 입소문과 시각적인 효과에 관한 영향력의 크기를 정확하게 구분하기 어렵고, 미니태양광 채택 의도에 영향을 미치는 인식의 변화에 관해서는 알 수 없다. 다양한 영향력 있는 변수에 관한 개별 가구의 인식을 조사한다면 보다 신뢰할 만한 변수를 확인할 수 있을 것이다. 그러므로 후속 연구로 미니태양광 설치에 관한 개별 가구의 인식을 조사하는 연구를 수행할 필요가 있다.

참 고 문 헌

- 고재경·이미홍(2010). 사회연결망 분석을 이용한 지역 환경거버넌스 특성 연구. 한국정책학회보, 19(1), 151-181.
- 권명순·장지혜(2017). 혁신확산모델에 근거한 원격건강관리시스템의 질적 분석. Journal of Korean Academy of Community Health Nursing, 28(2), 129-143.
- 김민수(2017). ICLEI 가입이 지방자치단체의 에너지 소비에 미치는 영향 분석. 서울대학교 대학원 석사학위 논문.
- 김희수·염시창(2018). Rogers 의 혁신확산이론에 기초한 교사의 e-러닝 정책 수용·확산 검사 개발. 교육정보미디어연구, 24(1), 23-52.
- 백종학·윤순진(2015). 서울시 ‘원전 하나 줄이기’를 위한 전략적 틈새로서 미니태양광사업과 에너지 시민성의 변화: 서울시 노원구 주민 인식조사를 바탕으로. 서울도시연구, 16(3), 91-111
- 서울특별시(2014). 서울 에너지정책의 희망메시지 원전하나줄이기
- 서울특별시(2017). 원전하나줄이기 시민백서
- 서울특별시(2017). 2017 에너지 백서
- 염성찬·이용균(2015). 서울시 태양광 보급 정책의 적정보조금 산정에 관한 연구 - 수용자적 입장에서의 재무성 분석을 중심으로. 환경영향평가, Vol 24 No 4, pp317~331.
- 이강준(2015). 박원순 서울시장의 에너지정치와 시민참여 거버넌스. 경제와사회, 107, 140-172.
- 이석준·이상욱·홍보영·엄홍민·신희석·김경민(2014). 대시메트릭 매핑 기법을 이용한 서울시 건축물별 주거인구밀도의 재현. 한국공간정보학회지, 22(3), 89-99.
- 이성재(2018). 비가격 개입을 통한 가정부문 에너지 소비 감축 및 생산

- 유인 효과. 서울대학교 환경대학원 박사학위 논문.
- 이재석(2018a), Seoul Energy Brief, 서울에너지공사
- 이재석(2018b), 소규모 태양광 보급 확대를 위한 적정 보조금 산정, 서울에너지공사
- 이인원·이영미(2013). 정치·경제·사회적 유사성이 협력 거버넌스 형성에 미치는 영향: ERGM 분석을 중심으로. 정부학연구, 19(2), 109-142.
- 이희연·노승철(2012). 고급통계분석론 - 이론과 실습-. 경기: 문우사
- 정바울·황영동(2011). 자생적 학교 혁신의 확산 경로와 과정에 대한 연구. 교육행정학연구, 29(2), 313-338.
- 천현숙·윤정숙(2001), 아파트 주거문화의 진단과 대책, 국토연구원 2001-31
- 홍종호·엄영숙·오형나·라영수·김지영·이성재(2017), 전력소비자 행태분석을 통한 에너지기술혁신 방안 연구, 에너지기술평가원 연구과제
- Rogers, E. M.(2005). 개혁의 확산. 커뮤니케이션 북스.
- Allen, Robert.(2013). “Energy transitions in history: The shift to Coal,” in Inger (ed.), *Energy Transitions in History*: 11-15.
- Arkesteijn, K., & Oerlemans, L.(2005). The early adoption of green power by Dutch households: An empirical exploration of factors influencing the early adoption of green electricity for domestic purposes. *Energy Policy*, 33(2), 183-196.
- Bollinger, B., & Gillingham, K.(2012). Peer effects in the diffusion of solar photovoltaic panels. *Marketing Science*. 31(6). 900-912.

- Braitto, M. T., Böck, K., Flint, C., Muhar, A., Muhar, S., & Penker, M.(2017). Human-nature relationships and linkages to environmental behaviour. *Environmental Values*, 26(3), 365-389.
- Busic-Sontic, A., & Fuerst, F. (2018). Does your personality shape your reaction to your neighbours' behaviour? A spatial study of the diffusion of solar panels. *Energy and Buildings*, 158, 1275-1285.
- Cameron, A. C. and Trivedi, P. K., 2013, *Regression Analysis of Count Data* Second edition. Cambridge
- Chaix, B., Simon, C., Charreire, H., Thomas, F., Kestens, Y., Karusisi, N., Vallée, J., Oppert, J.-M., Weber, C., Pannier, B.,(2014). The environmental correlates of overall and neighborhood based recreational walking (a cross-sectional ana-lysis of the RECORD Study). *Int. J. Behav. Nutr. Phys. Act.* 11, 20.
- Chen, K. K.(2014). Assessing the effects of customer innovativeness, environmental value and ecological lifestyles on residential solar power systems install intention. *Energy Policy*, 67, 951-961.
- Chen, Y. C., & Dobra, A. (2017). Measuring Human Activity Spaces With Density Ranking Based on GPS Data. *arXiv preprint arXiv:1708.05017*.
- Dharshing, S.(2017). Household dynamics of technology adoption: A spatial econometric analysis of residential solar photovoltaic (PV) systems in Germany.

- Energy research & social science, 23, 113-124.
- Dobra, A., Bärnighausen, T., Vandormael, A., & Tanser, F.(2017).
Space-time migration patterns and risk of HIV
acquisition in rural South Africa. AIDS (London,
England), 31(1), 137.
- EIA.(2017). International Energy Outlook 2017 Overview. U.S.
Energy Information Administration.
- Frederiks, Elisha R., Karen Stenner, Elizabeth V. Hobman(2015),
Household energy use: Applying behavioural
economics to understand consumer
decision-making and behaviour, Renewable and
sustainable energy reviews, 41: 1385-1394
- Gelman, R., Meshek, M.,(2013). 2012 Renewable Energy Data Book.
Technical report. U.S. Department of Energy.
- Golledge, R.G. and R.J. Stimson(1997) Spatial Behavior, The
Guilford Press, New York and London.
- Graziano, M., & Gillingham, K.(2014). Spatial patterns of solar
photovoltaic system adoption: the influence of
neighbors and the built environment. Journal of
Economic Geography, 15(4). 815-839.
- Hägerstrand, T. (1952) The propogatoin of innovation waves Lund
Studies in Geography: Series B (Vol. 4). Lund,
Sweden: University of Lund.
- Hong, T., Lee, M., Koo, C., Jeong, K., & Kim, J.(2017).
Development of a method for estimating the
rooftop solar photovoltaic (PV) potential by
analyzing the available rooftop area using
Hillshade analysis. Applied Energy, 194, 320-332.

- Janssen, M. A., & Jager, W. (2002). Stimulating diffusion of green products. *Journal of Evolutionary Economics*, 12(3), 283-306.
- Jayaweera, N., Jayasinghe, C. L., & Weerasinghe, S. N.(2018). Local factors affecting the spatial diffusion of residential photovoltaic adoption in Sri Lanka. *Energy Policy*, 119, 59 - 67.
- Kellstedt, P. M., Zahran, S., & Vedlitz, A.(2008). Personal efficacy, the information environment, and attitudes toward global warming and climate change in the United States. *Risk Analysis: An International Journal*. 28(1). 113-126.
- Keeling, M. J. & Eames, K. T. D.(2005), "Networks and Epidemic Models", *Journal of the Royal Society Interface*, 2(4), 295-307.
- Kiss, I. Z., Broom, M., Craze, P. G. & Rafols, I.(2010), "Can Epidemic Models Describe the Diffusion of Topics Across Disciplines?", *Journal of Informetrics*, 4(1), 74-82.
- Korsching, P.(2001). Diffusion Research in the 1990s and Beyond. In *Diffusion research in rural sociology: The record and prospects for its future* (pp. 105-134). Social Ecology Press Middleton, WI.
- Kwan, C. L. (2012). Influence of local environmental, social, economic and political variables on the spatial distribution of residential solar PV arrays across the United States.
- Lam, J. C.(1998). Climatic and economic influences on residential

- electricity consumption. *Energy Conversion and Management*. 39(7). 623-629.
- Lee, E. J., Lee, J., & Eastwood, D.(2003). A two step estimation of consumer adoption of technology based service innovations. *Journal of Consumer Affairs*. 37(2). 256-282.
- Leiserowitz, A.(2006). Climate change risk perception and policy preferences: The role of affect, imagery, and values. *Climatic change* 77(1-2). 45-72.
- Liere, K. D. V., & Dunlap, R. E.(1980). The social bases of environmental concern: A review of hypotheses, explanations and empirical evidence. *Public opinion quarterly*. 44(2). 181-197.
- Manski C.F.(1993), Identification of endogenous social effects: the reflection problem, *Rev. Econ. Stud.* 60(3). 531 - 542.
- Meseguer, C.(2005). Policy learning, policy diffusion, and the making of a new order. *The Annals of the American Academy of Political and Social Science*, 598(1), 67-82.
- Mills, B., Schleich, J.(2012). Residential energy-efficient technology adoption, energy conservation, knowledge, and attitudes: an analysis of European countries. *Energy Policy* 49, 616 - 628.
- Morris, M. G., & Venkatesh, V.(2000). Age differences in technology adoption decisions: Implications for a changing work force. *Personnel psychology*. 53(2). 375-403.

- Müller, S., & Rode, J.(2013). The adoption of photovoltaic systems in Wiesbaden, Germany. *Economics of Innovation and New Technology*. 22(5). 519-535.
- Parkins, J. R., Rollins, C., Anders, S., & Comeau, L.(2018). Predicting intention to adopt solar technology in Canada: The role of knowledge, public engagement, and visibility. *Energy Policy*, 114, 114 - 122.
- Perchoux, C., Chaix, B., Brondeel, R., & Kestens, Y. (2016). Residential buffer, perceived neighborhood, and individual activity space: New refinements in the definition of exposure areas - The RECORD Cohort Study. *Health & place*, 40, 116-122.
- Rai, V. & Robinson, S. A.(2013). Effective information channels for reducing costs of environmentally-friendly technologies: evidence from residential PV markets. *Environ. Res. Lett.* 8, 014044.
- _____ & Robinson, S. A.(2015). Agent-based modeling of energy technology adoption: Empirical integration of social, behavioral, economic, and environmental factors. *Environmental Modelling & Software*, 70, 163-177.
- _____ & Henry, A. D.(2016). Agent-based modelling of consumer energy choices. *Nature Climate Change*, 6(6), 556.
- Richter, L.L.,(2013). Social Effects in the Diffusion of Solar Photovoltaic Technology in the UK, EPRG Working Paper.

- Rockström, et al.(2009). Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and society*. 14(2): 32
- Rode, J., & Weber, A.(2016). Does localized imitation drive technology adoption? A case study on rooftop photovoltaic systems in Germany. *Journal of Environmental Economics and Management*. 78. 38-48.
- Rodriguez-Oreggia, E., & Yopez-Garcia, R. A.(2014). Income and energy consumption in Mexican households. The World Bank.
- Ryan, B., & Gross, N. C.(1943). The diffusion of hybrid seed corn in two Iowa communities. *Rural sociology*, 8(1), 15.
- Schönfelder, S., & Axhausen, K. W.(2003). Activity spaces: measures of social exclusion?. *Transport policy*, 10(4), 273-286.
- Singhal, A., & Rogers, E. M.(2003). Combating AIDS: Communication strategies in action. Sage.
- Soytas, U., R. Sari and B. T. Ewing, 2007. Energy consumption, income, and Carbon emissions in the United States. *Ecological Economics*, 62: 482~489
- Snape, J. R.(2016). Spatial and temporal characteristics of PV adoption in the UK and their implications for the smart grid. *Energies*, 9(3).
- Steffen, W. et al.(2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223), 1259855.

- Stern, P. C.(2000), "New Environmental Theories: Toward a Coherent Theory of Environmentally Significant Behavior." *Journal of Social Issues*. vol.56, no.3, 407-424.
- Towler, Brian F.(2014). "The History and Culture of Energy," *The Future of Energy*. Academic Press: 1-15.
- Valente, T. W.(1996). Network models of the diffusion of innovations. *Computational & Mathematical Organization Theory*, 2(2), 163-164.
- Vasseur, V., & Kemp, R.(2015). The adoption of PV in the Netherlands: A statistical analysis of adoption factors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd.
- Villanueva, K., Knuiman, M., Nathan, A., Giles-Corti, B., Christian, H., Foster, S., Bull, F.(2014). The impact of neighborhood walkability on walking: does it differ across adult life stage and does neighborhood buffer size matter? *Health Place* 25, 43 - 46.
- Wolske, K. S., Stern, P. C., & Dietz, T.(2017). Explaining interest in adopting residential solar photovoltaic systems in the United States: Toward an integration of behavioral theories. *Energy research & social science*, 25, 134-151.
- Wooldridge, Jeffrey M., 2006, *Introductory econometrics a modern approach*, Third edition
- Zahran, S., Brody, S.D., Vedlitz, A., Lacy, M.G., Schelly, C.L.(2008). Greening local energy: explaining the

geographic distribution of household solar energy use in the United States. J. Am. Plan. Assoc. 74 (4), 419 - 434.

Zenk, S.N., Schulz, A.J., Matthews, S.A., Odoms-Young, A., Wilbur, J., Wegrzyn, L., Gibbs, K., Braunschweig, C., Stokes, C.,(2011). Activity space environment and dietary and physical activity behaviors: a pilot study. Health Place 17, 1150 - 1161.

Abstract

Diffusion Factors of Mini Solar Photovoltaic of Apartments in the Diffusion of Innovation Theory

– Focusing on the Spatial Patterns –

Kim, Moon-Hyun

Environmental Management Major

Department of Environmental Planning

Graduate School of Environmental Studies

Seoul National University

Various efforts have been made to reduce CO_2 emissions in response to climate change. The electric energy sector is no exception. Traditionally, fossil fuels such as coal have been widely used to produce electricity because they are affordable source, however, they have a fatal weakness that releases a large amount of CO_2 into the air. This is the reason that renewable

energy which produces almost zero-emission with CO_2 in the process of generating electricity attracts attention to mitigate the CO_2 concentration in the atmosphere. Solar power generation is growing at the fastest pace in the world among various renewable energy sources.

Seoul city has implemented the policy of “One Less Nuclear Power Plant” to raise electricity self-sufficiency and to reduce energy consumption since 2012. The residential solar photovoltaic(PV) system is one of the main business for that policy and they aim to supply it to one million households by 2022. The another policy of “Solar City Seoul, 2022” was proclaimed in order to achieve this goal in 2017. In particular, the policy of spreading mini solar PV, which is installed on balcony in apartment deserves to be evaluated as a policy that reflects the spatial characteristics of compact land use and high population of the city, and it is rapidly spreading in Seoul. Meanwhile, Seoul Metropolitan Government and its District Governments subsidize households for the installation of mini solar PV. They are provided maximum 75% of incentives to install mini solar PV, it is excessive aspects considering that Seoul has a target of 605,185 households with a mini solar PV by 2022. It is clear that the financial burden of Seoul city will increase. For this reason, alternative policies to reduce subsidies are studied, but at the same time, concerns about the reduction of subsidies may hamper the spread of the mini solar PV.

The diffusion of innovation is a theory that seeks to describe the spreading process of new ideas. In previous researches, common rules are presented among those who accept innovations, and communications between the members is

important. This can be explained by the social interaction that occurs within homogeneous groups. In addition, studies have shown that the distance employs a negative effect on the diffusion of innovation. Various studies exist to identify characteristics of the diffusion of innovation in residential solar system.

This study investigates the characteristics of the spread of mini solar PV from 2014 to 2017 in apartment complexes in Seoul. The adoption rate of mini solar PV in Seoul increases rapidly, but the degree and level vary depending on the region. It can be inferred that there are effective factors brought about spatial differences in adoption rates. Therefore this study examines variables affecting the diffusion of mini solar PV in apartment regarded as homogeneity area. We also study the extent of spatial influence while verifying whether peer effects affect to the adoption of mini solar PV.

We collect the balanced continuous panel data for 795 apartment complexes between 2014 and 2017. Dependent variable is a number of new adopters for residential solar PV in 795 subsample apartment complexes in a year. It consists of count data only with positive integers, and it is characterized by discrete distribution with excess zeros. For this reason, zero-inflated negative binomial(ZINB) regression models were run. Independent variables consists of five factors such as demographic, economic, social, built environment and peer effects, and 16 variables. The analysis model proceeded in three steps. Model 1 is based on the entire sample of the apartment complexes in Seoul, and subsample for Model 2 and 3 is defined by 10 districts with apartment complexes that engage in the

energy community program and the other 10 without them. Model 4 and 5 refer to the hot and cold spots for each 5 districts.

The results show that the more mini solar PV would be installed in an apartment complex if its proportion of middle-aged group(40-69 years of age), subsidy and number of households is high and the households income and building age is low and when its local governor belongs to The Democratic Party of Korea. Peer effects focusing on this study present statistically significant both within and between effects of apartment complexes. The installation density of mini solar PV is calculated to reflect a within peer effect, it presents that new adopters were positively affected. And we choose multi-buffers with 500m, 1,000m and 1,500m to identify influences between apartment complexes, a radius of 500m band affects to adopt mini solar PV. For energy community model, we compared two models between 10 districts with apartment complexes that engage in the energy community program for model 3 and the other 10 without them for model 4. It shows that energy community program affects to the adoption of mini solar PV and peer effects are actively presented in model 3. Finally, we also compared two models between 5 districts with hot spots and the other 5 districts with cold spots. We find that the result of hot spots is statistically significant for peer effects variables, but insignificant in cold spots.

This study empirically examines the presence of peer effects in the diffusion of mini solar PV. It suggests various ways for the policy of spreading mini solar PV in Seoul, which is expected to be financially burdensome in the future by depending on

subsidies. Furthermore, we find the possibility of spreading the mini solar PV directly or indirectly through energy community program. Lastly, our result shows that it is necessary to distinguish hot and cold spots based on the contribution by peer effects, and the policy should be developed in accordance with local characteristics.

Keywords : residential mini solar photovoltaic, renewable energy, diffusion of innovation theory, peer effects, urban area, energy community

Student Number : 2017–21221